

Technische Universität  
Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig



## **Probabilistische Situationsanalyse für eine adaptive automatisierte Fahrzeuglängsführung**

Von der Fakultät für Maschinenbau der  
Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation von

**Frank Schroven**  
aus Aachen

eingereicht am:	20. Dezember 2010
mündliche Prüfung am:	24. Juni 2011
Referenten:	Prof. Dr. B. Rumpe Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. E. Schnieder

2011

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Mitarbeiter der Volkswagen Konzernforschung in der Abteilung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit.

Ich danke Professor Dr. Bernhard Rumpe, dem Leiter des Lehrstuhls für Software Engineering an der RWTH Aachen, für die freundliche Betreuung dieser Arbeit und die Integration in seine Forschergruppe, die mir das Tor zur Softwaretechnik ein Stück geöffnet hat.

Für das Interesse an dieser Arbeit, die konstruktiven Ratschläge und die Übernahme der Berichterstattung danke ich Professor Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Eckehard Schnieder, dem Leiter des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der TU Braunschweig.

Professor Dr.-Ing. Ferit Kūçūkay, Leiter des Instituts für Fahrzeugtechnik der TU Braunschweig, danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich danke meinen Vorgesetzten Thomas Ruchatz und Dr.-Ing. Stefan Brosig sowie Carsten Spichalsky und Dr.-Ing. Christoph Keßler für die Ermöglichung dieser Arbeit und die fortwährende Unterstützung. Bei allen Kollegen bedanke ich mich für die überaus angenehme Arbeitsatmosphäre und vor allem bei Dr.-Ing. Tobias Giebel für die vielen anregenden Diskussionen. Dr.-Ing. Simon Karrenberg danke ich für die Durchsicht dieser Arbeit. Ein besonderer Dank gebührt Dr.-Ing. Thomas Eigel, von dem ich viel gelernt habe und der sehr zum Spaß bei der Erstellung dieser Arbeit beigetragen hat.

Meinen Eltern danke ich für all die Unterstützung, die sie mir bis heute haben zu Teil werden lassen und die Entscheidungsfreiheit, die sie mir in meinem bisherigen Leben ermöglichten.

Von Herzen danke ich meiner Frau Christina, die auf viel gemeinsame Zeit verzichtet und mich jederzeit unterstützt hat.

Wolfenbüttel, im Dezember 2010

Frank Schroven



# Zusammenfassung

Fahrerassistenzsysteme tragen heute bereits dazu bei, den Fahrkomfort und die Verkehrssicherheit zu steigern. Dabei sind die von Assistenzsystemen adressierten Bereiche der Fahraufgabe klar voneinander getrennt. So existieren Funktionen, die den Fahrer entweder bei der Längsführung, der Querverführung innerhalb des Fahrstreifens oder bei Fahrstreifenwechseln unterstützen. Durch die modulare Entwicklung und Vermarktung solcher Systeme ist der Umfang der jeweils zugrunde liegenden Sensorik zur Umgebungserfassung gering und der Datenaustausch der Umfeldinformationen zwischen den Systemen noch minimal. Die zunehmende Verbreitung von Assistenzsystemen wird jedoch zu Integration bzw. steigender Vernetzung führen, sodass ein tieferes maschinelles Verständnis der Fahrsituation ermöglicht wird. Einen Beitrag dazu liefert diese Arbeit, in der Daten des Fahrzeugumfelds und des Fahrzeugs sowie des Fahrers zur Interpretation der Verkehrssituation in Verbindung gebracht werden. Ziel dieser Situationsanalyse ist es, Fahrmanöver des Fahrers zu erkennen und damit das Verhalten von Assistenzsystemen anzupassen. Dazu wird ein allgemeines Modell zur Erkennung von Fahrmanövern erarbeitet und am Beispiel einer automatisierten Längsführung für Fahrstreifenwechsel konkretisiert. Zur Qualitätssicherung, die besonders bei der Verwendung probabilistischer Verfahren eine Herausforderung darstellt, werden automatische Softwaretests eingesetzt. Damit ist es möglich, die Auswirkungen von Änderungen effizient, automatisiert und wiederholbar zu überprüfen. Die hierfür notwendige Infrastruktur wird im Rahmen dieser Arbeit bereitgestellt. Die Erkennung von Fahrstreifenwechseln wird abschließend in realen Versuchsfahrten untersucht. Das veränderte Verhalten des Längsführungssystems wird für verschiedene Ausprägungen eines Fahrstreifenwechsels in Simulationen demonstriert.



# Abstract

Driver assistance systems used in current vehicles contribute towards increasing driving comfort and improving road safety. The different aspects of the driving task addressed by assistance systems are clearly separated from one another. This means that there are separate functions assisting the driver with regard to longitudinal vehicle control, lateral vehicle control within a lane or when changing lanes. Due to modular development and the way that such systems are marketed, the number of sensors gathering environmental data for the given systems is still small and there is only little ambient data exchanged between the individual assistance systems. The increasing use of driver assistance systems in vehicles, however, will entail the integration of systems and will also lead to increased interconnection. This, in turn, will allow the systems to gather more detailed information about the current driving situation. This work contributes to the abovementioned development by illustrating how data of the vehicle environment, the vehicle itself and the driver can be used in a combined manner to interpret the traffic situation. The objective of this situational analysis is to detect maneuvers performed by the driver and to use this information to adapt the behavior of assistance systems. In order to do so, this thesis establishes a general model for detecting driving maneuvers, which is then implemented in an automated longitudinal vehicle control system for changing lanes. Quality assurance poses a particular challenge when employing probabilistic methods. This challenge has been responded to by using automated software tests allowing the effects of changes to be tested in an efficient, automated and repeatable manner. The infrastructure required therefore is provided in this thesis. Finally, the detection of lane-change maneuvers is examined in real road tests. The adapted behavior of the longitudinal vehicle control system for different types of lane changes is furthermore illustrated by means of simulations.





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	2
1.2	Zielsetzung . . . . .	5
1.3	Vorgehensweise . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Stand der Technik – Kontext von Fahrerassistenzsystemen</b>	<b>9</b>
2.1	Grundlagen der Fahrerassistenzsysteme . . . . .	9
2.1.1	Unterteilung von Fahrerassistenzsystemen . . . . .	10
2.1.2	Übersicht zu Forschungsprogrammen . . . . .	12
2.2	Sensorik für Längsführungssysteme . . . . .	15
2.2.1	Radarsensoren . . . . .	17
2.2.2	Lidarsensoren . . . . .	19
2.2.3	Kamerasensorik . . . . .	19
2.3	Aktorik und Mensch-Maschine-Schnittstelle . . . . .	22
2.4	Maschinelle Situationsanalyse . . . . .	23
2.5	Fahrzeu glängsführung . . . . .	29
2.5.1	Geschwindigkeitsregelung . . . . .	33
2.5.2	Abstandsregelung . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Vorgehen zur Entwicklung neuartiger Fahrerassistenzsysteme</b>	<b>41</b>
3.1	Systemdefinition . . . . .	42
3.2	Analyse . . . . .	44
3.2.1	Anforderungsermittlung . . . . .	44
3.2.2	Modellierung . . . . .	50
3.3	Entwurf . . . . .	52
3.4	Implementierung . . . . .	57
3.5	Test . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Situationsanalyse</b>	<b>63</b>
4.1	Einführung . . . . .	63
4.2	Methoden zum Schlussfolgern . . . . .	64
4.2.1	Logik . . . . .	65
4.2.2	Dempster-Shafer-Evidenztheorie . . . . .	69

4.2.3	Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Logik . . . . .	71
4.2.4	Künstliche neuronale Netze . . . . .	73
4.3	Probabilistisches Schließen mit Bayes'schen Netzen . . . . .	73
4.3.1	Wahrscheinlichkeitstheoretische Grundlagen . . . . .	76
4.3.2	Eigenschaften Bayes'scher Netze . . . . .	78
4.3.3	Inferenz in Bayes'schen Netzen . . . . .	81
4.4	Dynamische Bayes'sche Netze . . . . .	84
4.5	Netztopologie zur Situationsanalyse . . . . .	87
4.5.1	3-Ebenen-Modell zur Fahrerintentionserkennung . . . . .	88
4.5.2	Frühzeitige Erkennung von Fahrstreifenwechseln . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Entwicklung einer situationsadaptiven automatisierten Längsführung</b>	<b>97</b>
5.1	Analyse . . . . .	97
5.2	Entwurf . . . . .	99
5.2.1	Logische Sicht . . . . .	99
5.2.2	Physikalische Sicht . . . . .	100
5.3	Implementierung . . . . .	103
5.3.1	Multifunktionales Längsregelmodell . . . . .	104
5.3.2	Softwarebibliothek für Bayes'sche Netze . . . . .	107
5.4	Test . . . . .	111
<b>6</b>	<b>Ergebnisse aus Fahrversuch und Simulation</b>	<b>125</b>
6.1	Erkennung von Fahrstreifenwechseln . . . . .	125
6.2	Verhaltensänderung der Längsregelung . . . . .	131
6.3	Ergebnisbetrachtung . . . . .	134
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>137</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>141</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>145</b>
<b>A</b>	<b>Äquivalente Inferenz in dynamischen Bayes'schen Netzen</b>	<b>147</b>
<b>B</b>	<b>Schnittstellenbeschreibung des multifunktionalen Längsregelmodells</b>	<b>149</b>
B.1	Eingang . . . . .	149
B.2	Ausgang . . . . .	151
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>153</b>

# Formelzeichen und Abkürzungen

## Lateinische Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung
$a_{\max}^-$	maximale Verzögerung des ACC-Systems
$a_{\max}^+$	maximale Beschleunigung des ACC-Systems
$a_s^-$	Verzögerung für Schleppbetrieb
$a_{\text{soll}}$	Sollbeschleunigung
$a_x$	Längsbeschleunigung
$b$	Basisbreite eines Stereokamerasystems
$p_B$	Bremsdruck
$P$	Wahrscheinlichkeitswert
$m$	Steigung der Schaltgeraden
$s_{\min}$	minimal erforderliche Reichweite
$s_{\min,A}$	minimal erforderliche Reichweite für Annäherung
$s_{\min,F}$	minimal erforderliche Reichweite für Folgefahrt
$t$	Zeit
$T$	Fuzzy-Wahrheitswert
$\mathbf{T}$	Trajektorie
$\dot{u}_{BP}$	Bremspedalgeschwindigkeit
$v$	Geschwindigkeit
$v_{\max,ACC}$	maximale ACC-Setzgeschwindigkeit
$V_v$	Verstärkungsfaktor des Geschwindigkeitsreglers
$\Delta v$	Geschwindigkeitsdifferenz
$\Delta v_{\text{Obj,max}}$	Maximale Differenzgeschwindigkeit zwischen Regelobjekt und geregelterm Fahrzeug
$x$	Position in Längsrichtung
$\Delta x$	Abstand (konturbezogen)
$\Delta \tilde{x}$	Abstand (Schwerpunkt zu Schwerpunkt)
$\Delta \hat{x}$	Abweichung vom Sollabstand
$X^{t_k}$	Zufallsvariable $X$ in der Zeitscheibe $t_k$
$\ddot{y}$	Querbeschleunigung
$\Delta y$	lateraler Versatz innerhalb des Fahrstreifens

## Griechische Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung
$\alpha$	Öffnungswinkel des Sensorsichtbereichs
$\mu_i$	Zugehörigkeitsfunktion zur Menge $i$
$\tau$	Zeitlücke zum Vorderfahrzeug
$\Delta\psi$	Gierwinkelfehler
$\dot{\psi}$	Gierwinkelgeschwindigkeit
$\sigma$	Standardabweichung

## Abkürzungen

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
AKTIV	Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligen- ten Verkehr
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CAN	Controller Area Network
DDS	Data Distribution Service
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsystem
FRA	Fahrtrichtungsanzeiger
GUI	Graphical User Interface
HMI	Human Machine Interface
INVENT	Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik
KNN	Künstliche neuronale Netze
Lidar	Light Detection and Ranging
LIN	Local Interconnect Network
MOST	Media Oriented Systems Transport
MoTiV	Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr
PATH	Partners for Advanced Transit and Highways
PROMETHEUS	Program for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety
Radar	Radio Detection and Ranging
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
UML	Unified Modeling Language

# Kapitel 1

## Einleitung

Der Fahrkomfort in einem Personenkraftwagen konnte während der letzten Jahre durch immer steifere Karosserien, bessere Isolation von Schallquellen und Automatisierung von früher manuell betätigten Einrichtungen (z. B. elektrische Fensterheber) kontinuierlich gesteigert werden. Um den Fahrer auch bei der primären Fahraufgabe selbst, d. h. der Längs- und Querverführung seines Fahrzeugs, zu unterstützen, ist es erforderlich, dass Fahrzeuge Kenntnis von ihrer Umgebung erlangen. Mit diesem Wissen können sie angemessen auf verschiedene Situationen reagieren. Dazu sind zwei Herangehensweisen zu unterscheiden (Behringer 1997), zwischen denen der Schwerpunkt verschoben werden kann. Ein Mindestmaß an Sensorik im Fahrzeug ist stets notwendig.

**Infrastruktureinrichtungen** Hierzu zählen passive Elemente (z. B. Magnetnägel), an denen sich Fahrzeuge orientieren können, oder Kommunikationseinrichtungen, die Informationen über andere Fahrzeuge oder die Umwelt (z. B. Verkehrsschilder, Ampelphasen) senden. Die in Fahrzeugen erforderliche Ausstattung ist vergleichsweise gering.

**Fahrzeugumfeldsensoren** Hierunter werden Maßnahmen verstanden, die nicht auf Erweiterung der Infrastruktur angewiesen sind. Der Verlauf eines Fahrstreifens wird beispielsweise anhand seiner üblichen Kennzeichnung, d. h. Fahrstreifenmarkierungen, detektiert. Hierzu wird jedoch eine gegenüber dem Ansatz der Infrastrukturerweiterung umfangreichere Ausstattung<sup>1</sup> der Fahrzeuge erforderlich.

Infrastrukturmaßnahmen gehen mit hohen Gesamtkosten einher, die zu starken Belastungen der öffentlichen Kassen führen. Bei einem solchen zentralen Ansatz sind technische Ausfälle außerdem folgenreich, da hiermit in dem betroffenen Areal für alle Nutzer keine oder nur eingeschränkte Funktionalität zur Verfügung steht. Auch aus diesen Gründen stellen dezentrale Lö-

---

<sup>1</sup> zur Erkennung von Fahrstreifenmarkierung z. B. ein Kamerasystem

sungen wie auf Umfeldsensoren basierende Fahrerassistenzsysteme einen aussichtsreichen Weg zur Steigerung von Verkehrssicherheit und Fahrkomfort dar.

Der technologische Fortschritt, insbesondere im Bereich von Komfortsystemen, ist nicht zuletzt auf den Wunsch des Menschen zurückzuführen, Aufgaben durch technische Systeme selbsttätig ausführen zu lassen (Schnieder 1999). Fahrerassistenzsysteme erfreuen sich zunehmender Beliebtheit, die sich in steigender Nützlichkeit aus Kundensicht und wachsender Kaufbereitschaft äußert (Happe und Lütz 2008). Unter ihnen werden die automatische Distanzregelung *Adaptive Cruise Control (ACC)* und *PreCrash-Systeme*<sup>2</sup> überdurchschnittlich positiv bewertet. Die positive Wahrnehmung von Fahrerassistenzsystemen mit Umfeldwahrnehmung resultiert aus dem steigenden Unfallvermeidungspotenzial (Neunzig 2004; Gründl 2005; Gwehenberger u. a. 2008). So ist im Bereich der Auffahrunfälle Unaufmerksamkeit des Fahrers eine der Hauptunfallursachen (Knoll 2005). Hier können Assistenzsysteme durch Beobachtung der vorausfahrenden Fahrzeuge helfen, die Reaktionszeit des Fahrers (durch Fahrerwarnung) und die Ansprechdauer der Bremsanlage (durch Anlegen der Bremsbeläge an die Bremsscheiben) zu reduzieren. Ein weiterer Aspekt bei der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen ist die Steigerung der Verkehrssicherheit durch ein geändertes Fahrerverhalten. Im Fall der Nutzung von ACC wurde von Abendroth (2001) beobachtet, dass Fahrer bei vergleichbaren Abständen zu Vorderfahrzeugen geringere Durchschnittsgeschwindigkeiten wählen, wenn das Assistenzsystem aktiviert ist.

### 1.1 Motivation

Mit dem zunehmenden Einzug von Fahrerassistenzsystemen steht eine wachsende Anzahl an Sensoren zur Umfelderkennung zur Verfügung. Aus der Vernetzung dieser zur Zeit meist noch dedizierten Sensoren ergibt sich die Möglichkeit, Informationen mehrfach zu nutzen. Die Vernetzung kann auf verschiedenen Wegen erreicht werden:

- *Kommunikation* zwischen Einzelsystemen über ein geeignetes Medium
- *Integration* mehrerer Funktionen in einem Steuergerät

---

<sup>2</sup>PreCrash-Systeme umfassen Maßnahmen, die den Verlauf und die Folgen eines nicht mehr zu vermeidenden Unfalls positiv beeinflussen sollen. Dazu zählt beispielsweise das Auslösen einer automatischen Notbremsfunktion.

Ein höheres Maß an Kommunikation erfordert die Bereitstellung einer geeigneten Infrastruktur. Bei der Nutzung heute üblicher Vernetzungsmedien (z. B. CAN-Bus, *Controller Area Network*) müssen zusätzliche Schnittstellen geschaffen werden, da die ansonsten internen Informationen einzelner Steuergeräte (z. B. Fahrstreifenkrümmung eines Querführungssystems) im Übertragungsnetzwerk publiziert werden müssen. Dies führt zu einer höheren Belastung des Übertragungsmediums und stellt höhere Anforderungen an die beteiligten Kommunikationspartner. Die Integration von Funktionen bietet den Vorteil, dass der Bauraumbedarf und die Stückkosten sinken (Schöning u. a. 2004).<sup>3</sup> Unabhängig vom Weg, der für eine weitere Vernetzung gewählt wird, ergeben sich folgende Verbesserungspotentiale für Fahrerassistenzsysteme:

- Größen, die Einzelsystemen bisher unbekannt waren bzw. geschätzt werden mussten, könnten direkt aus Messungen gewonnen werden. So könnte die Zielauswahl des ACC stark von einer mittels Kamerasystem erkannten Fahrstreifenkrümmung vor dem Fahrzeug profitieren, da eine Schätzung mittels objektgebender Sensorik nur eingeschränkt möglich ist.
- Die Kombination von Informationen ermöglicht eine Analyse der Fahrsituation und damit eine Anpassung von Fahrerassistenzsystemen. Im Fall von ACC kann eine Anpassung an die Fahrsituation und nicht nur das Verhalten des Führungsfahrzeuges durchgeführt werden.

Der wesentliche Teil dieser Arbeit befasst sich mit dem Aspekt der Situationsanalyse. Der Begriff der Situationsanalyse ist dabei nicht eindeutig. Bei einer fahrerzentrierten Betrachtung können insbesondere folgende Gesichtspunkte adressiert werden (Kopf 2005):

- Aufmerksamkeit, Ermüdung des Fahrers
- Ablenkung, Abwendung des Fahrers
- Situationsbewusstsein des Fahrers
- Belastung, Beanspruchung des Fahrers
- Fahrerabsicht, Fahrmanöver

Erkenntnisse zur Aufmerksamkeit bzw. dem Grad der Müdigkeit werden z. B. von Coelingh u. a. (2006) behandelt und vereinzelt für Fahrerassistenzsysteme in Serienfahrzeugen genutzt (Kushitani 2008). Eine Erkennung der Mü-

<sup>3</sup>Bei disjunkten Arbeitsbereichen ist der Kostenvorteil maximal. So ist ein Steuergerät für ein Einparksystem und einen Spurhalteassistenten denkbar, da die Funktionen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten aktiviert werden können.

digkeit ermöglicht es, den Fahrer vor einem eventuell drohenden Sekunden-schlaf zu warnen oder Warnschwellen von anderen Fahrerassistenzsystemen anzupassen. Wenn der Fahrer seine Ressourcen bewusst (Abwendung) bzw. unbewusst (Ablenkung) von der Fahraufgabe zurückzieht, kann er nur noch eingeschränkt auf sich verändernde Randbedingungen in seinem Umfeld reagieren. Gleiches gilt für fehlendes Situationsbewusstsein. Es ist beispielsweise nicht ausreichend, zu detektieren, ob ein Fahrer in die Richtung eines potentiell gefährlichen Objekts blickt, da hiermit nicht sichergestellt ist, dass er das Objekt tatsächlich wahrgenommen und erkannt hat. Die entsprechende Klasse von Unfällen wird als „Looked But Failed to See“ bezeichnet (Brown 2005). Eine Situationsanalyse kann außerdem zum Ziel haben, die noch freien Ressourcen des Fahrers abzuschätzen. Durch das verkehrliche Umfeld (z. B. Verkehrsstörungen, bauliche Besonderheiten) oder Umweltbedingungen (Tageszeit, Wetter) ergibt sich eine objektive Belastung, die zu einer fahrerindividuellen subjektiven Beanspruchung führt. Kurzfristig nicht zeitkritische Meldungen an den Fahrer (z. B. Hinweis auf geringen Kraftstoffvorrat) können mit dem Wissen über die Fahrerbeanspruchung adäquat ausgegeben werden.

Das Ziel der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Situationsanalyse sind Rückschlüsse auf die Fahrerabsicht und damit auf die beabsichtigen bzw. durchgeführten Fahrmanöver. Eine solche Instanz ist bei heutigen Fahrerassistenzsystemen entweder schwach ausgeprägt oder nicht vorhanden.

Im Bereich der Bahnführung ist die automatische Distanzregelung bereits seit vielen Jahren für Serienfahrzeuge verfügbar. Wie einige andere Systeme (z. B. Spurverlassenswarnung) ist sie in erster Linie für Autobahnen und gut strukturierte Landstraßen konzipiert und legt eine strikte Annahme über den vom Fahrer geplanten Weg zugrunde: Das Assistenzsystem vermutet die Fahrt innerhalb eines Fahrstreifens. Im Fall von ACC führte dies dazu, dass Systeme der ersten Generation erst zwei Sekunden nach einem Fahrstreifenwechsel nach links begannen zu beschleunigen (Abendroth 2001). Ebenso bemängelten Probanden späte Bremsenriffe bei der Annäherung an langsamere Fahrzeuge. Dies ist besonders zu Beginn der ACC-Entwicklung auch auf die damals geringe Reichweite der Sensoren zurückzuführen. Bei hohen Relativgeschwindigkeiten zwischen dem geregelten Fahrzeug und einem vorausfahrenden Objekt kann es hierdurch zu verspäteten Systemreaktionen und unkomfortablen Fahrsituationen kommen. Spätere Untersuchungen von ACC-Systemen zeigten jedoch, dass sich diese Kritikpunkte im Kern nicht nennenswert verändert haben (Spiegel Insitut Mannheim 2005; Schick u. a. 2007).



Als Reaktion auf diese Unzulänglichkeiten wurden Mechanismen geschaffen, die das Systemverhalten anpassen können, wenn die Fahrerhandlungen von den zugrunde liegenden Annahmen des Assistenzsystems abweichen. Bei einem Fahrstreifenwechsel kann dazu der entsprechende Fahrtrichtungsanzeiger ausgewertet werden. Bei einer automatischen Distanzregelung kann dies zu einer Dynamikverstellung des Reglers führen (Steinle u. a. 2006). Bei versehentlich aktiviertem Fahrtrichtungsanzeiger oder noch nicht adäquater Szene<sup>4</sup> sind diese Reaktionen jedoch unangemessen und könnten in vielen Fällen durch eine weitergehende Analyse der Situation vermieden werden – im Fall von ACC z. B. bei Fahrt auf dem linken Fahrstreifen einer Autobahn bzw. Berücksichtigung weiterer Objekte aus dem Umfeld.

Für die Entwicklung von Software in Fahrzeugen im Allgemeinen und Fahrerassistenzsystemen im Speziellen ist eine wachsende Komplexität festzustellen. Um dabei ein Höchstmaß an Qualität zu erreichen, sind verschiedene Qualitätssicherungsmaßnahmen erforderlich. Die zentrale Aktivität dabei ist das Testen der Software. Modultest-Software sorgt hier für das nötige Rahmenwerk, um Testfälle zu erzeugen, zu aggregieren und geordnet auszuführen. Für textuelle Programmiersprachen existiert dabei eine Familie von *xUnit*-Modultest-Software<sup>5</sup>, der gemeinsame Prinzipien zu Grunde liegen. Ein zentraler Grundsatz dabei ist, dass die Sprache, mit der Testfälle erzeugt werden, identisch mit der Sprache der zu testenden Software ist. Zur Erzeugung von neuen Funktionen werden bei der automobilen Softwareentwicklung häufig Matlab-Simulink-Modelle (Mathworks 2009) eingesetzt, aus denen automatisch C-Code für Steuergeräte generiert werden kann. Die dabei zur Verfügung stehende Modultest-Software erlaubt in der Regel keine Erstellung von Testfällen mit Simulink selbst.

## 1.2 Zielsetzung

Ausgehend vom aufgezeigten Kontext soll in dieser Arbeit folgende Leitfrage beantwortet werden:

Wie können für ein Fahrerassistenzsystem zur automatisierten Längsführung Schlüsse über die Absicht des Fahrers gezogen werden, um das Verhalten des Assistenzsystems anzupassen?

Dabei soll ein Vorgehen beschrieben werden, wie Fahrerassistenzsysteme in der industriellen Forschung entwickelt werden können. Für die erzeugten

<sup>4</sup>siehe Begriffserklärung auf Seite 63

<sup>5</sup>Der Buchstabe x ist ein Platzhalter für den Namen einer Programmiersprache, z. B. cpp für C++

Softwaremodule soll außerdem eine Möglichkeit zur automatisierten Ausführung von Testfällen und Generierung von Ergebnisberichten geschaffen werden.

### 1.3 Vorgehensweise

In Kapitel 2 wird einleitend ein Überblick zu Fahrerassistenzsystemen gegeben. Dazu werden zunächst verschiedene Kategorien von Assistenzsystemen genannt und es wird weiterhin auf große Forschungsprogramme eingegangen. Da das hier relevante Fahrerassistenzsystem auf Umfeldsensorik basiert, werden verschiedene Umgebungserfassungsverfahren erläutert. Dazu werden die Eigenschaften von Radar<sup>6</sup>- und Lidar<sup>7</sup>-Sensoren sowie von Kamerasystemen dargestellt. Anschließend werden gängige Aktoren zur Realisierung einer Längsregelung behandelt und Arbeiten erwähnt, welche die Benutzerschnittstelle von Längsregelsystemen betreffen. Es folgt ein Abschnitt zu bisher verfolgten Ansätzen zur maschinellen Situationsanalyse. Dabei werden die Arbeiten anhand des Einsatzes für konkrete Applikationen unterschieden. Die Arbeiten zur applikationsspezifischen Situationsanalyse werden weiterhin in solche zur Optimierung der Benutzerinteraktion bzw. zur Beeinflussung von Bahnführungssystemen gegliedert. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Situationsanalyse zur Manipulation einer automatisierten Längsregelung verwendet. Das Kapitel schließt daher mit einem Abschnitt, in dem das angewendete Prinzip der Längsregelung verdeutlicht wird. Die gewählte Reglerstruktur ermöglicht eine anschauliche Anpassung des Reglerverhaltens an verschiedenen Verkehrssituationen.

Kapitel 3 beschreibt allgemein ein Vorgehen zur prototypischen Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. Dabei werden zunächst verschiedene Ausgangspunkte zur Definition neuartiger Systeme aufgezeigt. Anschließend werden die Aktivitäten Analyse, Entwurf, Implementierung und Test unterschieden. Die Analyse gliedert sich in die Anforderungsermittlung sowie Systemmodellierung. Der Abschnitt zum Entwurf des Fahrerassistenzsystems beschreibt die verschiedenen Entwurfssichten und wie Muster bei der Entwicklung eingesetzt werden können. Es folgt ein Abschnitt, der die Implementierung des Systems beschreibt und dabei auf die Bedeutung von Codierungsrichtlinien eingeht. Das Kapitel endet mit einer ausführlichen Darstellung der Testmethoden, die während der Entwicklung eingesetzt werden kön-

---

<sup>6</sup>Radio detection and ranging

<sup>7</sup>Light detection and ranging

nen. Dabei werden sowohl Komponententests als auch verschiedene Möglichkeiten zum Gesamtsystemtest erläutert. Das Spektrum der Gesamtsystemtests reicht dabei von Simulatoruntersuchungen über Teilsimulationen und Objektimitationen bis zu Realtests.

Das Kapitel 4 beginnt mit der Untersuchung von verschiedenen Verfahren zur Situationsanalyse und bewertet anschließend ihre Eignung bezüglich der Anwendung für Fahrerassistenzsysteme im Rahmen dieser Arbeit. Probabilistische Netze werden dort als ein geeignetes Verfahren identifiziert. Dabei wird detailliert auf die Eigenschaften und Inferenzalgorithmen für Bayes'sche Netze eingegangen. Anschließend wird ausgehend von einer allgemeinen Betrachtung von Fahrsituationen ein Modell zur Fahrerintentionserkennung abgeleitet, das sich als kausales Bayes'sches Netz darstellen lässt. Am Beispiel von Fahrstreifenwechseln wird ein solches Netz für die Verwendung in Verbindung mit einer automatisierten Längsführung erzeugt.

Kapitel 5 greift die Aktivitäten zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen (Kapitel 3) wieder auf und beschreibt sie konkret für die Entwicklung einer situationsadaptiven automatisierten Längsführung. Für die Implementierung wird in dieser Arbeit das graphische Programmierwerkzeug Simulink verwendet. Eine wesentliche Anforderung an das Modell ist dabei, dass es gleichermaßen den Einsatz in einem Experimentalfahrzeug als auch in Simulationen ermöglichen soll. Beim Entwurf wird die logische Sicht auf das Softwaresystem beschrieben und ein detaillierter Einblick in den physikalischen Aufbau des verwendeten Experimentalfahrzeugs gegeben. Um Bayes'sche Netze intuitiv implementieren zu können, wird ein Rahmenwerk für Simulink erzeugt, das die graphische Modellierung von Bayes'schen Netzen entsprechend des Modells zur Fahrerintentionserkennung ermöglicht. Zur Qualitätssicherung dieses Rahmenwerks werden unter anderem Softwaretests verwendet. Dazu wird eine Modultest-Software erweitert, sodass entsprechend der *xUnit*-Prinzipien Tests automatisiert ausgeführt werden können. Berichte über die Testergebnisse werden automatisch generiert.

Abschließend werden in Kapitel 6 die Inferenzalgorithmen zur Erkennung von Fahrstreifenwechseln in realen Fahrversuchen erprobt und die Veränderung des Längsregelverhaltens simulativ für verschiedene Fahrsituationen untersucht.



## Kapitel 2

### Stand der Technik – Kontext von Fahrerassistenzsystemen

That the automobile has practically reached the limit of its development is suggested by the fact that during the past year no improvements of a radical nature have been introduced.

---

*(Scientific American, 1909)*

In diesem Kapitel wird ein allgemeiner Überblick zu Fahrerassistenzsystemen gegeben. Abschnitt 2.1 zeigt diverse Möglichkeiten zur Unterteilung von Fahrerassistenzsystemen und nennt bedeutende Forschungsprojekte aus diesem Bereich.

Abschnitt 2.2 geht auf die im automobilen Umfeld eingesetzte Sensorik ein. Dabei werden lediglich solche Sensorkonzepte erwähnt, die für Längsführungssysteme geeignet scheinen oder sich bereits etabliert haben.

In Abschnitt 2.3 werden gängige Aktoren zur Beeinflussung der Längsdynamik vorgestellt. Außerdem wird auf den Aspekt der Schnittstelle zwischen Fahrer und dem Assistenzsystem eingegangen.

Abschließend wird in Abschnitt 2.4 ein Überblick zu bereits geleisteten Arbeiten im Bereich der Situationsanalyse gegeben. Die Arbeiten werden nach ihrem adressierten Anwendungsbereich unterschieden.

#### 2.1 Grundlagen der Fahrerassistenzsysteme

Schon seit Beginn der Automobilgeschichte wurde nach Mechanismen gesucht, die das Führen eines Fahrzeugs erleichtern. Anfangs konzentrierten sich die Maßnahmen auf fahrzeuginterne Fragestellungen. So erlaubte die

Synchronisierung in Handschaltgetrieben Gangwechsel ohne Zwischengas und die zunächst hydraulische Lenkkraftunterstützung reduzierte das erforderliche Fahrerlenkmoment. Solche Fahrzeugsysteme haben inzwischen verbreitet Einzug in Serienfahrzeuge gehalten.

Gegenüber diesen auf grundlegende Einzelaspekte bezogenen Assistenzsysteme befassen sich heutige Fahrerassistenzfunktionen mit der gesamten Fahrzeugführung. Sie stützen ihr Verhalten dabei zunehmend auf Daten von Sensoren, die das Umfeld des Fahrzeugs, z. B. andere Verkehrsteilnehmer, erfassen. Eine Definition für Fahrerassistenzsysteme lautet nach Reichart und Haller (1995):

Ein *Fahrerassistenzsystem* soll den Fahrer nach dessen Regeln durch Informationen, Interaktion oder autonome Handlungen bei der Bewältigung von (Teil-)aufgaben der verschiedenen Fahrzeugführungsebenen unterstützen.

Die Elemente eines Fahrerassistenzsystems (Abbildung 2.1) sind nach Reichart und Haller (1995):

- Umgebungserfassung
- Bewertung der Situation und modellgestützte Bestimmung eines Sollverhaltens des Fahrzeugs
- daraus abgeleitete Handlung

Je nach Systemausprägung kann der Handlungsaspekt fehlen oder nur als Anweisung ausgeprägt sein. Ebenso kann die Bewertung von Informationen entfallen und es werden lediglich (eventuell aufbereitete) Sensordaten in geeigneter Art und Weise angezeigt.<sup>1</sup>

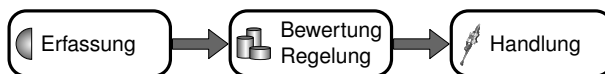


Abbildung 2.1: Allgemeine Struktur eines Fahrerassistenzsystems

### 2.1.1 Unterteilung von Fahrerassistenzsystemen

Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten zur Klassifizierung von Fahrerassistenzfunktionen vorgestellt. Die Unterteilung lehnt sich dabei an bestehende Modelle der Fahraufgabe an.

<sup>1</sup>In diese Kategorie fallen z. B. Kamerasysteme im Frontbereich, die es ermöglichen aus einer

### Priorität der Tätigkeit

Die Tätigkeiten beim Führen eines Fahrzeugs lassen sich entsprechend ihrer Priorität in drei Kategorien einteilen. Von **Bubb (2002)** werden primäre, sekundäre und tertiäre Fahraufgaben unterschieden. Zu den primären Fahraufgaben zählen Tätigkeiten wie das Navigieren, die Wahl der Trajektorie sowie die Fahrzeugstabilisierung. Das Einstellen des Betriebszustands, z. B. Gangwahl, Betätigung von Fahrtrichtungsanzeiger oder Scheibenwischer, wird als sekundäre Fahraufgabe bezeichnet. In den Bereich der tertiären Fahraufgaben fallen alle Tätigkeiten, die das Ambiente im Fahrzeug beeinflussen. Dies sind beispielsweise Temperaturregelung und die Bedienung des Radios.

### Wirkfeld

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal für Fahrzeugsysteme ist ihr Haupteinflussbereich. Viele Fahrerassistenzsysteme adressieren die Bereiche Komfort bzw. Sicherheit. Das Antiblockiersystem (*ABS*), das ein vollständiges Blockieren der Räder zur Erhaltung der Lenkfähigkeit des Fahrzeugs verhindert, stellt ein Assistenzsystem der aktiven Sicherheit dar. *ACC* wird hingegen üblicherweise als Komfortsystem angesehen, gleichwohl es einen positiven Einfluss auf die aktive Sicherheit haben kann. In Anbetracht steigender Fahrzeugbestände bei nahezu konstanter Kapazität des Straßennetz werden Systeme seit geraumer Zeit auch unter gesamtverkehrlichen Gesichtspunkten untersucht.<sup>2</sup>

### Fahrzeugführungskomponente

Bei vereinfachter Betrachtung der Fahrzeugbewegung weist das Fahrzeug drei Freiheitsgrade auf: Die Längs- und Querbewegung sowie die Rotation um die Fahrzeughochachse. Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer häufig bei der Fahrzeugführung hinsichtlich einzelner Freiheitsgrade. Das elektronische Stabilitätsprogramm (*ESP*) dient beispielsweise der Gierstabilisierung des Fahrzeugs. Dabei werden einzelne Räder derart gebremst, dass zu starke bzw. geringe Gierbewegungen des Fahrzeugs durch eine Regelung der Giergeschwindigkeit und des Schwimmwinkels ausgeglichen werden.

### Fahrzeugführungsebene

Eine weit verbreitete Unterteilung nach der Fahrzeugführungsebene geht auf **Donges (1982)** zurück. Demnach kann die Fahraufgabe in drei Bereiche zer-

---

<sup>1</sup> Straßeneinmündung zu den Seiten zu sehen, wenn der Blick des Fahrers noch verdeckt ist.

<sup>2</sup> Zwischen den Jahren 2000 und 2008 ist der Fahrzeugbestand bei gleichbleibender Straßenlänge in Deutschland von 45,7 auf 49,3 Millionen Fahrzeuge (+7,9 %) gestiegen (**Statistisches Bundesamt 2009**).

legt werden, denen sich üblicherweise Zeithorizonte zuordnen lassen, die den temporalen Einflussbereich der Handlungen quantifizieren:

**Navigation** In den Bereich Navigation fällt die Auswahl einer Route, die vom Startpunkt zum gewünschten Ziel führt. Hierbei unterstützen moderne Navigationssysteme und können bei der Wahl einer Route verschiedene Aspekte berücksichtigen (z. B. kürzeste oder schnellste Route). Entscheidungen, die in diesem Bereich getroffen werden, beeinflussen die nächsten Minuten und nicht selten Stunden.

**Bahnführung** Zu den Aufgaben im Bereich der Bahnführung zählen z. B. das Spurhalten, d. h. Fahren innerhalb des eigenen Fahrstreifens, oder Abstandhalten zu vorausfahrenden Fahrzeugen. Die relevanten Zeitspannen umfassen üblicherweise mehrere Sekunden.

**Stabilisierung** Handlungen im Bereich der Stabilisierung sind meist von sehr kurzer Dauer. Dabei können die bereits erwähnten Systeme ABS und ESP den Fahrer unterstützen.

Tabelle 2.1 klassifiziert gängige Fahrerassistenzsysteme nach der von ihnen adressierten Fahrzeugführungsebene. In dieser Arbeit stehen Fahrerassistenzsysteme der Bahnführung, insbesondere Adaptive Cruise Control, im Fokus. Die weltweit erste Serieneinführung eines ACC-Systems fand bereits 1995 in Japan im Mitsubishi Diamante statt (Ludmann 1995). Das laserbasierte System war zum Preis von 4000 US \$ als Zusatzausstattungsmerkmal verfügbar. Die Einbauraten waren allerdings gering und die meisten Systeme wurden von Wettbewerbern gekauft (Breuer 2004).

Neuartige Fahrerassistenzsysteme entstehen insbesondere auf der Ebene der Bahnführung. Hier findet man Verkehrssituationen, in denen bisher wenige Assistenzsysteme verfügbar sind. Dazu zählt beispielsweise der Verkehr an Kreuzungen, der unter anderem in verschiedenen internationalen Förderprojekten adressiert wird (INTERSAFE-2 2010; SAFESPOT 2010).

## 2.1.2 Übersicht zu Forschungsprogrammen

Von 1964 bis 1980 wurde in den USA an der Ohio State University das Langzeitforschungsprojekt *Automated Highway Studies* durchgeführt, das vor allem die Kapazitätserweiterung von Autobahnen zum Ziel hatte (Fenton und Mayhan 1991). Dabei wurden folgende Ansätze betrachtet:

- Bildung von Fahrzeugpaletten (Stapelung von Fahrzeugen)
- mechanische Kopplung von Fahrzeugen (*Entrainment*)



<b>Navigation</b>	
Navigationssystem	Automatischer Notruf
<b>Bahnführung</b>	
Automatische Distanzregelung	Bremsassistent
Spurverlassenswarnsystem	Adaptives Kurvenlicht
Spurhalteassistent	Fernlichtassistent
Kollisionswarnsystem	Verkehrszeichenanzeige
Automatische Notbremsung	Nachtsichtsystem
Fahrstreifenwechselassistent	Müdigkeitskontrolle
<b>Stabilisierung</b>	
Elektronisches Stabilitätsprogramm	Antiblockiersystem
Elektronische Differentialsperre	Antriebsschlupfregelung
Gespannstabilisierung	

Tabelle 2.1: Zuordnung verschiedener Fahrerassistenzsysteme zu den drei Bahnführungsebenen

- nichtmechanische Kopplung von Fahrzeugen zu Kleingruppen (*Platooning*) mit geringem Abstand innerhalb der Gruppen (1 m) und größerer Abstände zwischen den Gruppen (100 m)

Obwohl die damit zu erzielenden Durchsatzraten vielversprechend sind, haben die genannten Verfahren entscheidende Nachteile. Die Bildung von Fahrzeugpaletten verlangt einen hohen Verladeaufwand und wird heutzutage im Bahnverkehr in geringem Umfang eingesetzt.<sup>3</sup> Die mechanische und nichtmechanische Kopplung von Fahrzeugen bringt Komfortnachteile durch Verzögerungen mit sich, da die Fahrzeuge beim Einfädeln in eine Fahrzeuggruppe nach Fahrtzielen sortiert werden müssen. Darüber hinaus darf der psychologische Effekt auf den Fahrer bei einem sehr geringen Abstand zum Vordermann nicht vernachlässigt werden. Wegen der genannten Nachteile wurden deshalb abschließend Maßnahmen für individuelle Fahrzeuge vorgeschlagen, die bei moderatem Abstand möglichst gleichmäßig verteilt sind. Solche Maßnahmen – teils verbunden mit Kommunikation zwischen Fahrzeugen oder Infrastruktureinrichtungen – werden auch heute noch zur Durchsatzerhöhung und damit aktiven Stauvermeidung verfolgt (z. B. [Kesting u. a. 2005](#)).

<sup>3</sup>Abgesehen von der Sonderverbindung Niebüll–Westerland bietet die Deutsche Bahn Verbindungen zwischen sieben deutschen und zehn europäischen Städten an ([Deutsche Bahn 2008](#))

Eines der ersten großen Forschungsprojekte, das viele Aspekte des Straßenverkehrs behandelte, war das europäische Programm *PROMETHEUS* (Program for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety, 1986–1994). Dabei wurden die Themenfelder Verkehrseffizienz, Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit adressiert (Voy u. a. 1986). Braess (2003) gibt einen Überblick über die Arbeiten im Rahmen von *PROMETHEUS*. Es wurden dabei insgesamt 23 Fahrzeugfunktionen untersucht, die sich in die Kategorien *fahrzeugautonom* und *infrastrukturbezogen* unterteilen lassen. Jeweils thematisch gruppierte Funktionen wurden in insgesamt zehn Experimentalfahrzeugen (*Common European Demonstrator*, CED) realisiert. Mit CED 5 (*Autonomous Intelligent Cruise Control*) wurden die Grundsteine für heutige ACC-Systeme gelegt.

Nach dem Start von *PROMETHEUS* wurden weltweit technologisch ähnliche Programme gestartet. In den USA wurde ebenfalls 1986 das noch über das Jahr 2009 aktive Programm *PATH* (*Partners for Advanced Transit and Highways*) ins Leben gerufen, das vom *Institute of Transportation Studies* (ITS) der University of California (Berkeley) in Zusammenarbeit mit dem kalifornischen Verkehrsministerium (Caltrans) verwaltet wird (PATH 1986). Die erklärten Ziele sind die Erhöhung der Verkehrssicherheit und Straßenkapazität sowie die Verringerung von Verkehrsstörungen, Luftverschmutzung und Kraftstoffverbrauch.

In Japan begannen Anfang der neunziger Jahre Aktivitäten, die den Schwerpunkt auf Verkehrsflussoptimierung (*Vehicle Information and Communication System*, *Super Smart Vehicle Systems*) und dem einfachen Entrichten von Mautgebühren mittels Infrastruktureinrichtungen (*Electronic Toll Collection*) legten (Tsugawa und Fujii 1991; VICS 1990). Im Jahr 1996 wurde die *Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association* (AHSRA) gegründet (AHSRA 1996). Die Forschungsbereiche umfassen dabei vornehmlich das Zurverfügungstellen von Informationen über den Fahrbahnzustand, Gefahrenwarnungen, assistiertes Fahren und automatisches Fahren.

Nach dem Ende von *PROMETHEUS* wurden die deutschen Forschungsarbeiten ab 1996 in dem vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) geförderten Projekt *MoTiV* (Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr) fortgesetzt. In diesem Rahmen wurden eine Machbarkeitsstudie zu *ACC im Ballungsraum* (ACC<sup>ib</sup>) durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass sich die ACC-Funktionalität durch die Situationsvielfalt in städtischen Umgebungen nur teilweise realisieren lässt. Bei Projektende im Jahr 2000 wurde daher abschließend vorgeschlagen, den Einsatzbereich von ACC zunächst auf Stausituationen in gut strukturiertem Verkehr, d. h. Autobahnen, auszu-

weiten (Naab u. a. 2000).

Im Anschluss an das MoTiV-Projekt wurde 2001 ein weiteres europäisches Forschungsprogramm initiiert: *INVENT* (Intelligenter Verkehr und nutzergerichte Technik). Im Themenbereich Fahrerassistenz/Aktive Sicherheit wurden die Ergebnisse aus MoTiV im Projekt *Stauassistenz* aufgegriffen (*INVENT STA 2005*). Neben einer automatischen Distanzregelung für Verkehrsstörungen wurde der Fahrer außerdem bei der Querverführung unterstützt. Der Unterstützungsgrad reichte dabei von leichter Assistenz bis zur vollständigen Übernahme der Querregelung. Da allerdings immer noch Einschränkungen in der Umfeldsensorik hinsichtlich Erfassungsbereich und Deutung der Informationen auftraten, waren die Stelleingriffe der entwickelten Systeme beschränkt.

Im Jahr 2006 wurde die vom BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) geförderte deutsche Forschungsinitiative *AKTIV* (Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr) ins Leben gerufen (*AKTIV 2006*). Die Initiative teilt sich dabei in die drei Projekte *Verkehrsmangement*, *Aktive Sicherheit* und *Cooperative Cars* auf. Im Bereich der Fahrerassistenzsysteme wird hier der Fokus auf Sicherheitsfunktionen gelegt. So wurden bis 2010 im Bereich Aktive Sicherheit z. B. Notbremssysteme (*Aktive Gefahrenbremsung*) oder kontinuierliche Querverführungssysteme (*Integrierte Querverführung*) behandelt.

## 2.2 Sensorik für Längsführungssysteme

Im Folgenden wird ein Überblick zu Sensortechnologien gegeben, die für eine automatische Distanzregelung geeignet sind. Auf andere Sensorkonzepte für Assistenzsysteme der Bahnführung (z. B. Ultraschallsensoren für Einparksysteme) wird deshalb nicht näher eingegangen. Für die Abstandsregelung sind neben Sensoren zur Ermittlung von fahrzeuginternen Größen (z. B. Geschwindigkeit) Umfeldsensoren erforderlich, um Objekte vor dem eigenen Fahrzeug zu detektieren. Dabei müssen vor allem der Abstand zum Vorderfahrzeug und die Relativgeschwindigkeit bezüglich des Vorderfahrzeugs zuverlässig ermittelt werden.

Für die Fahrt mit einer automatischen Distanzregelung können folgende Fahrsituationen unterschieden werden:

1. Freifahrt (d.h. ohne relevantes Vorderfahrzeug)
2. Annäherung an ein langsames Fahrzeug (evtl. mit Fahrstreifenwech-

sel des Vorderfahrzeugs oder des eigenen Fahrzeugs)

3. Stationäre Folgefahrt

4. Relevantes Vorderfahrzeug entfernt sich, wechselt den Fahrstreifen oder eigenes Fahrzeug wechselt in einen leeren Fahrstreifen

Aus diesen Situationen lassen sich Anforderungen an die Sensorik hinsichtlich der erforderlichen Detektionsreichweite ableiten. Letztgenannte Gruppe von Fahrsituationen hat keinen Einfluss auf eine Mindestsensorreichweite, da das Vorderfahrzeug an Relevanz verliert. Ähnliches gilt für die ungestörte Fahrt (1.), da hier eine Geschwindigkeitsregelung aktiv ist.

Aus den Situationsgruppen 2 (Annäherung) und 3 (Folgefahrt) lassen sich Anforderungen an die Sensorik ableiten (Mayr 2001). Die Mindestsensorreichweite  $s_{\min,A}$  beim Annähern an ein langsames oder sogar stehendes Hindernis wird beeinflusst durch die maximale Verzögerung<sup>4</sup>  $a_{\max}^-$ , die das ACC-System aufbringen kann und die maximale Differenzgeschwindigkeit eines Objekts  $\Delta v_{\text{Obj,max}}$ , die das System abbauen kann:

$$s_{\min,A} = -\frac{\Delta v_{\text{Obj,max}}^2}{2 \cdot a_{\max}^-}$$

Für eine stationäre Folgefahrt sind der maximal einstellbare Wunschabstand sowie die maximale Setzgeschwindigkeit  $v_{\max,ACC}$  entscheidend. Der Wunschabstand wird in Form einer Zeitlücke<sup>5</sup> angegeben. Mit der maximal einstellbaren Zeitlücke  $\tau_{\max}$  gilt:

$$s_{\min,F} = v_{\max,ACC} \cdot \tau_{\max}$$

Die minimal erforderliche Sensorreichweite ergibt sich schließlich als Maximum aus  $s_{\min,A}$  und  $s_{\min,F}$ :

$$s_{\min} = \max \{s_{\min,A}, s_{\min,F}\}$$

Ein zweites wesentliches Merkmal eines Sensors zur automatischen Distanzregelung ist der horizontale Sichtbereich. Bei der Bestimmung des erforderlichen horizontalen Öffnungswinkels der Sensorik, sind folgende Situationen relevant:

1. Einscheren eines Vorderfahrzeugs

<sup>4</sup>Im Folgenden werden die Begriffe *Beschleunigen* für positive Beschleunigungen bzw. *Verzögern* für negative Beschleunigungen verwendet.

<sup>5</sup>Die Zeitlücke zum Vorderfahrzeug beschreibt die Zeit, nach der das eigene Fahrzeug bei konstanter Geschwindigkeit den Aufenthaltsort des Vorderfahrzeugs zum Betrachtungszeitpunkt er-

2. Fahrstreifenwechsel des eigenen Fahrzeugs
3. Kurvenfahrt
4. Abbiegen

Die Situationsgruppen 1 und 2 werden charakterisiert durch den minimalen Abstand in Längsrichtung, bei dem versetzt fahrende Fahrzeuge erkannt werden sollen. Bei diesem Abstand sollte der horizontale Sichtbereich der Sensorik die Fahrstreifenbreite erreicht haben. Insbesondere bei Stop & Go-Systemen sowie beim Einsatz in urbanen Umgebungen ist eine Objekterkennung auch bei geringen Abständen erforderlich. Diese Anforderung kann durch die Wahl eines geeigneten Einbauorts oder die Kombination mehrerer Sensoren erfüllt werden.

Bei Kurvenfahrt bestimmt hauptsächlich der minimal zu befahrende Kurvenradius  $\rho_{\min}$  die Anforderung an den Öffnungswinkel der Sensorik. Ein kleinerer Öffnungswinkel führt zu früherem Zielverlust bzw. einer späteren Aufnahme eines Ziels. Bei Winner und Luh (2007) findet man den Vergleich von zwei Sensoren mit Öffnungswinkeln von  $\pm 4^\circ$  bzw.  $\pm 8^\circ$ . Dabei konnte ein erheblich besseres Kurvenverhalten für die Variante mit größerem Öffnungswinkel festgestellt werden. Die Kombination aus maximaler Zeitlücke  $\tau_{\max}$  und maximaler ACC-Geschwindigkeit  $v_{\max,ACC}$  in Verbindung mit dem minimalen Kurvenradius erfordert theoretisch den größten Öffnungswinkel. Beschränkt man die Betrachtung jedoch auf komfortable Querbeschleunigungen, ergeben sich geringere Anforderungen. Abbiegemanöver können als Extremfall der Kurvenfahrt betrachtet werden. Bei starr angeordneten Sensoren<sup>6</sup> ergibt sich ein sehr großer erforderlicher Öffnungswinkel, wenn Objekte auch nach dem Abbiegen kontinuierlich verfolgt werden sollen.

### 2.2.1 Radarsensoren

Die Anfänge der Forschung zur radarbasierten Abstandsmessungen für Fahrzeuge gehen auf die fünfziger Jahre des 20. Jahrhunderts zurück (Breuer 2004). Abbildung 2.2a zeigt ein Forschungsfahrzeug aus dem Jahr 1974, bei dem die designneutrale Integration des Sensors noch nicht abgeschlossen ist. Zur Messung von Abstand und Relativgeschwindigkeit senden Radargeräte elektromagnetische Wellen aus und empfangen die an Objekten hervorge-

---

reicht.

<sup>6</sup>In Forschungsprojekten wurden auch bewegliche Sensoren eingesetzt, um den Wahrnehmungsfokus von der Fahrzeugausrichtung zu entkoppeln (siehe z. B. Siedersberger 2003).



(a)



(b)

Abbildung 2.2: Experimentalfahrzeug mit Radarsensorik (a) aus dem Jahr 1974 (Mende 1999), heutiger 77 GHz-Radarsensor (inkl. Steuergerät) (b)

rufenen Reflexionen. Man unterscheidet dabei verschiedene Radarmessverfahren nach der Sendeart (diskontinuierlich bzw. kontinuierlich) und der Form der emittierten Signale (Meinecke 2001). Bei Geräten, die nach dem Pulsradar-Verfahren arbeiten, wird ein Radarpuls ausgesendet und durch Laufzeitmessung (Zeitdifferenz zwischen gesendetem und empfangenem Signal) lässt sich bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit die Entfernung bestimmen. Bei Auswertung aufeinanderfolgender Pulse kann die Relativgeschwindigkeit des detektierten Objekts unter Ausnutzung des Doppler-Effekts bestimmt werden (Puls-Doppler-Verfahren). Radarsensoren nach dem Dauerstrichprinzip (*continuous wave*) senden kontinuierlich Signale aus. Dabei kommen z. B. linear frequenzmodulierte Trägersignale zum Einsatz. Die empfangenen Reflexionen enthalten überlagerte Entfernungs- und Geschwindigkeitsinformationen. Durch Auswertung mehrerer Modulationszyklen (*Chirps*) kann die Entfernung und Relativgeschwindigkeit von Objekten ermittelt werden. Eine Sonderform der Dauerstrichradare stellt das frequenzumgetastete Radar (*Frequency Shift Keying*, FSK) dar. Dabei wird zyklisch zwischen zwei unmodulierten Trägersignalen mit geringer Differenzfrequenz umgeschaltet. Dieses Messverfahren stellt geringere Anforderungen an die Sendeeinrichtung des Sensors, da sie lediglich für zwei Frequenzen ausgelegt werden muss. Im automobilen Kontext sind 77 GHz- und 24 GHz-Radargeräte für den Fern- bzw. Mittel- und Nahbereich etabliert. Abbildung 2.2b zeigt beispielhaft

einen 77 GHz-Fernbereichsradar mit einem Öffnungswinkel von  $\pm 6^\circ$ , der sich im Serieneinsatz befindet. Der Sensor bildet dabei eine Einheit mit dem Signalverarbeitungsteil und dem Steuergerät, auf dem die Funktion (hier automatische Distanzregelung) implementiert ist.

### 2.2.2 Lidarsensoren

Das Funktionsprinzip von Lidarsensoren ist dem von Pulsradarsensoren ähnlich. Eine Laserdiode emittiert einen Laserimpuls und eine Photodiode empfängt das reflektierte Signal. Durch Laufzeitmessung wird die Entfernung zu Objekten im Erfassungsbereich bestimmt. Da sie im Aufbau grundlegend verschieden sind, werden folgende Varianten von Lasersensoren unterschieden (von Reyher 2006):

**Laserscanner** Scannende Lidarsensoren haben *eine* Strahlenquelle und der Laserstrahl wird über eine bewegliche Optik (z. B. rotierender Spiegel) abgelenkt. Dadurch lassen sich besonders große Öffnungswinkel erzielen. Zusätzlich scannen solche Lidarsensoren häufig in mehreren Ebenen und ermöglichen damit auch Aussagen über die Höhe von Objekten. Außerdem können Effekte (z. B. Bodenreflexionen), die durch Fahrzeugnicken hervorgerufen werden, kompensiert werden.

**Multibeam-Laser** Als Feststrahler konzipierte Lidarsensoren setzen mehrere Laserdioden parallel ein. Dabei erhöht jeder weitere Strahl die Kosten für einen solchen Sensor. Um eine höhere Anzahl an Strahlen zu vermeiden, kann das Strahlenbündel mittels geeigneter Maßnahmen nach Bedarf geschwenkt werden (*Multibeam Sweep*).

Wegen ihrer besseren horizontalen Auflösung bieten Lasersensoren die Möglichkeit Quergeschwindigkeiten von Objekten zu schätzen und liefern außerdem Informationen über die Objektbreite. Jedoch muss die Relativgeschwindigkeit durch Differentiation des Abstandsmessung bestimmt werden. Eine direkte Messung unter Ausnutzung des Doppler-Effekts ist nur mit großem technischen Aufwand und damit verbundenen hohen Kosten möglich, da die Frequenzverschiebung aufgrund der Relativbewegung im Megahertz-Bereich liegt, die Trägerfrequenz jedoch im Terrahertz-Bereich (Breuer 2004).

### 2.2.3 Kamerasensorik

Kamerasensorik hat zur Realisierung von Querführungsfunktionen (z. B. Spurverlassenswarnung) bereits Einzug in Serienfahrzeuge gehalten (Abbildung 2.3). Dabei werden Fahrstreifenmarkierungen auf Autobahnen und Landstra-



Abbildung 2.3: Monokulare Kamera für ein Spurhaltesystem, Einbauort: hinter der Windschutzscheibe im vom Wischer gereinigten Bereich

ßen sowie die Position und Ausrichtung des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens erkannt. Die eingesetzten Kameras sind meist monochrome Kameras, da die Farbinformation für die Erkennung von Fahrstreifenmarkierungen selten einen nennenswerten Zusatznutzen bringt. Dies gilt nicht für Systeme zur Verkehrszeichenerkennung, da die Farbinformation zur Bildsegmentierung genutzt werden kann (Gehrig 2000).

Für die Verwendung in Längsführungssystemen ist eine Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer notwendig. Hierzu sind grundsätzlich folgende Verfahren geeignet (Heisele 1998):

**Stereoskopie** Mit zwei in dieselbe Richtung ausgerichteten Kameras kann durch gleichzeitiges Auswerten der Bilder beider Kameras eine dreidimensionale Rekonstruktion der Umgebung vorgenommen werden. Dazu müssen korrespondierende Pixel<sup>7</sup> in den Bildern der Kameras gefunden werden (Korrespondenzproblem).

**Modellbasierte Verfahren** Mit einer einzelnen Kamera und einer Datenbasis, in der die Größen von Fahrzeugansichten und weitere Attribute (z. B. Symmetrieeigenschaften) abgelegt sind, kann der Abstand anhand der erkannten Merkmale im Bild geschätzt werden.

**Bewegungsbasierte Verfahren** Die durch die Eigenfahrzeug- und die Objektbewegung hervorgerufenen Verschiebungen von Objekten in konsekutiven Bildern einer Kamera können analog zum Stereoansatz zur Rekonstruktion der Szene genutzt werden.

---

<sup>7</sup>Korrespondierende Pixel sind Bildpunkte, welche dieselbe Stelle der Szene repräsentieren.



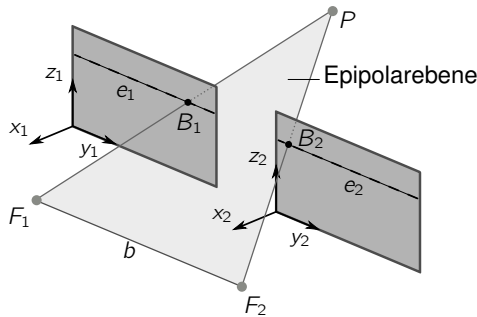


Abbildung 2.4: 3D-Rekonstruktion mit einem Stereokamerasystem nach Ermittlung der Korrespondenzpunkte  $B_1$  und  $B_2$

Stereoskopischen Verfahren wird dabei besondere Bedeutung zugesprochen. So erwartet [Paetzold \(2000\)](#), dass sobald sich das Einsatzgebiet von Fahrerassistenzsystemen der Bahnführungsebene auf den urbanen Raum ausweitet, der Einsatz einer Stereokamera als Sensor unumgänglich wird. Ein zentraler Grund dabei ist, dass es mit einem Stereokamerasysteme gelingt, erhabene Objekte vom Rest der Fahrbahn zu unterscheiden. Damit ist es möglich, stationäre Hindernisse zu detektieren, für die nur schwer abstrakte Modelle erstellt werden können (unstrukturierte Randbebauung, z. B. Verkehrsinseln). Das Prinzip soll daher im Folgenden näher erläutert werden.

Abbildung 2.4 zeigt ein Beispiel mit zwei parallel angeordneten Kameras (Fokuspunkte  $F_1, F_2$  mit Abstand  $b$ ). Durch die parallele Anordnung der Kameras wird das Korrespondenzproblem vereinfacht. Zur Identifikation von korrespondierenden Pixeln können verschiedene Merkmale wie z. B. Kanten verwendet werden. Nach Ermittlung der Korrespondenzpunkte  $B_1$  und  $B_2$  auf den Epipolarlinien  $e_1$  und  $e_2$  können die Koordinaten von  $P$  durch Triangulation ermittelt werden. Dabei wird ausgenutzt, dass der Punkt  $P$  in der durch  $\overline{F_1 B_1}$  und  $\overline{F_2 B_2}$  aufgespannten Ebene (Epipolarebene) liegen muss. Es ist zu beachten, dass die Rekonstruktion nur in Bildteilen möglich ist, die von beiden Kameras erfasst werden. Der effektive Sichtbereich kann durch Verdeckung oder nicht überlappende Erfassungsbereiche eingeschränkt sein.

Abschließend kann festgestellt werden, dass optischen Sensoren großes Potential beigemessen wird, da durch Bildverarbeitung Straßen, Fahrzeuge, Verkehrszeichen, Menschen und andere Arten von Objekten erkannt werden können ([Dickmanns 2005](#)). Die nachgelagerten Systeme zur Interpretation sind weiterhin Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte.

## 2.3 Aktorik und Mensch-Maschine-Schnittstelle

Fahrerassistenzsysteme der Bahnführungsebene treten wesentlich intensiver in Interaktion mit dem Fahrer als Systeme auf der Stabilisierungsebene wie ESP.<sup>8</sup> Es ist notwendig, eine möglichst einfache und transparente Mensch-Maschine-Schnittstelle (*Human Machine Interface*, HMI) zu schaffen, um verringerte Akzeptanz durch den Fahrer infolge fehlenden Systemverständnisses zu vermeiden (Kompuss und Huber 2006).

Positiven Einfluss hat die Lernfähigkeit des Fahrers, der mit zunehmender Nutzungsdauer beispielsweise ein kognitives Modell eines ACC-Systems entwickelt und die Systemgrenzen frühzeitig antizipiert, was zu einer Reduktion der Übernahmeaufforderung führt (Oberschätzl und Zollner 2008). Erste ACC-Systeme unterschieden sich deutlich von heute am Markt verfügbaren Varianten. So wurden zu Beginn der ACC-Entwicklung auch semiautomatische Distanzregelungen untersucht, bei denen der Fahrer das Gaspedal aktiv niederhalten musste, um das – wie es damals bezeichnet wurde – *Autonomous Intelligent Cruise Control* (AICC) zu aktivieren (Fastenmeier u. a. 1995). Trotz teilweise erheblicher Sensorschwächen wurden Fahrten mit solchen prototypischen ACC-Systemen in frühen Studien als sicherer, entspannter und weniger belastend wahrgenommen (Becker und Sonntag 1993). Das erste Seriensystem unterschied sich neben der Bedienung auch im Funktionsumfang von aktuellen Varianten, denn es konnte keine aktiven Bremsungen einleiten. Eine Verzögerung war lediglich durch Verringerung des Motor Moments zu erreichen, sodass das Fahrzeug infolge des Schleppmoments und der Fahrwiderstände langsamer wurde.<sup>9</sup> Fancher u. a. (1998) haben gezeigt, dass auch solche ACC-Systeme ohne aktiven Bremseingriff in Probandenstudien positiv bewertet werden. Systeme mit nur geringer aktiver Verzögerung ( $-1 \text{ m/s}^2$ ) sind hingegen schlecht einzuschätzen und werden daher negativ beurteilt (Nirschl u. a. 1999).

Von Mayser u. a. (2006) wird ein modifiziertes ACC-System vorgestellt, bei dem nicht nur die Wunschgeschwindigkeit und die Zeitlücke zum Vorderfahrzeug eingestellt werden können, sondern der Fahrer mittels einer zusätzlichen Bedieneinrichtung auch die Beschleunigung des Fahrzeugs beeinflussen kann. Diese zusätzliche Einrichtung soll z. B. bei der Annäherung an ein langsames Fahrzeug zum Tragen kommen, wenn das Objekt noch nicht im Erfassungsbereich des Sensors liegt, wohl aber vom Fahrer wahr-

<sup>8</sup>Da ein Fahrer das Fahrzeug üblicherweise innerhalb der Komfortgrenzen führt, greifen diese Systeme selten in die Fahrzeugbewegung ein.

<sup>9</sup>Dieses Verhalten findet man heute noch bei vielen Geschwindigkeitsregelanlagen.

genommen wird. Die Grundidee dieses modifizierten ACC-Systems war es, das fehlende Situationsbewusstsein durch Nutzung von Fahrereingaben zu kompensieren. Bei Versuchen mit Probanden stellte sich heraus, dass diese Erweiterung von Fahrern mit ACC-Erfahrung positiv bewertet wird. Fahrer ohne solche Erfahrung waren jedoch stark überfordert und zu keiner Bewertung in der Lage. Darüber hinaus ist unklar, ob sich Fahrer nach intensiver Nutzung dieser zusätzlichen Schnittstelle in Gefahrensituationen auf die ursprünglichen Bedieneinrichtungen wie Gas- und Bremspedal konzentrieren können. Außerdem wird eine solche Erweiterung des HMI aus ergonomischen Gründen in Frage gestellt. Bereits heutige ACC-Systemen weisen eine Reihe von Eingabemöglichkeiten auf: Ein-/Ausschalten des Gesamtsystems, Setzen der Wunschgeschwindigkeit, Erhöhen/Verringern der Wunschgeschwindigkeit, Abbrechen, Fortsetzen und das Erhöhen/Verringern der Zeitlücke (siehe Abbildung 3.2).

## 2.4 Maschinelle Situationsanalyse

Durch die Erfassung des Fahrzeugumfelds mittels geeigneter Sensorik ist es möglich geworden, eine neue Klasse von Fahrzeugfunktionen zu realisieren. Dabei ist die Komplexität des Gesamtsystems deutlich angestiegen. Im Gegensatz zu Assistenzsystemen im Bereich der Stabilisierung ist es nun nicht mehr ausreichend, ein Modell von dem *eigenen* Fahrzeug zu entwickeln, sondern es ist erforderlich, das dynamische Verhalten von *mehreren* Fremdfahrzeugen zu berücksichtigen. Auch wenn menschliche Fahrer Einzelgrößen (z. B. Abstände und Relativgeschwindigkeiten) nur relativ ungenau schätzen können (Fastenmeier 1995b), sind sie technischen Systemen im Bereich des Einschätzens von Fahrsituationen noch weit überlegen. Dabei ist ein Ergebnis bisheriger Forschungsvorhaben (siehe Abschnitt 2.1.2), dass Assistenz sehr eng mit einer möglichst genauen Vorstellung des Assistenzsystems von der Situation verbunden sein muss. Die bereits angeführte Definition eines Fahrerassistenzsystems wird deshalb von Haller (2001) erweitert:

*Fahrerassistenz* ist die Übernahme von Tätigkeiten unter Berücksichtigung der Intention des Fahrers.

Die Notwendigkeit einer Situationsanalyse bezüglich des eigenen Fahrzeugs wird auch von Nagel und Arens (2005) herausgestellt: „Ein Fahrerassistenzsystem vermag den Fahrer angemessener zu unterstützen, wenn es das vom Fahrer gerade durchgeführte Fahrmanöver kennt.“

Im Folgenden werden Arbeiten aus drei Bereichen der maschinellen Situationsanalyse vorgestellt. Zum einen findet man allgemeine Situationsanalysen ohne direkte Berücksichtigung von Fahrzeugfunktionen. Die Arbeiten mit direktem Bezug zu einer Applikation lassen sich in die Kategorien HMI und Bahnführungsfunktionen, insbesondere ACC, untergliedern.

### Allgemeine Situationsanalyse

**Zeller (1996)** untersucht die Erkennung der Pläne von Verkehrsteilnehmern. Komplexere Manöver (z. B. Überholen eines anderen Fahrzeugs) werden von **Zeller** durch Sequenzen von Teilplänen abgebildet. Zur Erkennung der Pläne wird die Dempster-Shafer-Evidenztheorie verwendet. Dabei wird auf die Notwendigkeit eines Manövers „Sonstiges“ hingewiesen, das immer dann zum Tragen kommt, wenn keine Handlung erkannt wird. Anderenfalls würde auch sich unsinnig verhaltenden Fahrern ein sinnvoller Plan unterstellt werden. **Zeller** weist außerdem darauf hin, dass für das Erkennen von Zuständen Kernbereiche (und keine Punkte im Merkmalsraum) sinnvoll sind. Als ein Indiz zur Erkennung einer Folgefahrt sollte daher ein Relativgeschwindigkeitsintervall im Bereich von 0 km/h und nicht die exakte Übereinstimmung von Vorder- und Eigenfahrzeuggeschwindigkeit geprüft werden.

**Blaschke u. a. (2007)** zeigen eine Fahrmanöverprädiktion, die sich unter anderem auf prädiktive Kartendaten und Objektdaten eines Radarsensors stützt. Zur Kombination der verschiedenen Sensordaten wird ein Fuzzysystem mit 110 Regeln verwendet, um die Manöver *Abbiegen*, *Überholen* und *Straße folgen* zu unterscheiden. Dabei werden Zeitfenster von einer Sekunde ausgewertet.

**Gerdas (2006a,b)** untersucht Fahrsituationen mit probabilistischen Netzen und wertet dabei eine Vielzahl von Sensordaten aus. So stehen neben verschiedenen Umfeldsensoren auch physiologische Daten (Herzschlag, Hautleitfähigkeit) sowie die Blickrichtung des Fahrers zur Verfügung. Es werden bis zu sieben Fahrmanöver unterschieden: *Anhalten*, *Freifahrt*, *Folgefahrt*, *Abbiegen nach links*, *Abbiegen nach rechts*, *Fahstreifenwechsel nach links* und *Fahstreifenwechsel nach rechts*. Ein Manöver wird hier als *erkannt* bezeichnet, wenn die Wahrscheinlichkeit dafür 70 % übersteigt. Wenn zwei Manöver die gleiche Wahrscheinlichkeit aufweisen und nur eines davon einen Manöverwechsel bedeuten würde, so wird dieses als unwahrscheinlicher bewertet, wodurch die Trägheit von Fahrzeugführern modelliert wird.

Ebenfalls mit Methoden der direkten Fahrerbeobachtung beschäftigen sich **Cheng und Trivedi (2006)**. Sie untersuchen anhand der Körperhaltung die Absicht des Fahrer abzubiegen. Der Algorithmus zur Erkennung des Manövers

basiert dabei auf Bayes'scher Inferenz. In diesem Zusammenhang werden verschiedene Möglichkeiten diskutiert, die zur Erfassung von Körperposen zur Verfügung stehen. Hierzu zählen mechanische, magnetische oder auf optischen Markern basierende Verfahren. Diese erfordern jedoch, dass der Fahrer jeweils ein bestimmtes Hilfsmittel an seinem Körper tragen muss. Solche Methoden sind für Forschungsarbeiten geeignet, für den automobilen Serieneinsatz sind sie jedoch schwer anwendbar. Erste recht grob auflösende Systeme ohne Marker, die eine Kopfabwendung von mehr als  $15^\circ$  aus der Geradeausstellung wahrnehmen, haben bereits Einzug in Serienfahrzeuge gefunden (Linder u. a. 2007). Ähnliche Methoden wurden von der gleichen Forschergruppe später angewendet, um Fahrstreifenwechsel bei Realfahrten zu präzisieren (McCall u. a. 2007). Trotz der langen Entwicklungszeit sei es jedoch nicht gelungen, eine ausreichend robuste Erkennung zu realisieren, die alle im automobilen Kontext auftretenden Situationen beherrscht (siehe auch Moeslund und Granum 2001). Insbesondere der große Konfigurationsraum (z. B. Belichtungsverhältnisse) und die Tendenz des Fahrers sich zu verdecken erschweren demnach die zuverlässige Erkennung.

Henning u. a. (2008) haben die Ermittlung der Fahrerabsicht mittels Fahrerblicken und Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers untersucht. Dabei wurde in über 98 % der Fahrstreifenwechsel ein Blick in den linken Außenspiegel festgestellt. Über 87 % erfolgten dabei vor der Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers. Zur Häufigkeit der Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers in solchen Situationen wurden recht unterschiedliche Ergebnisse gefunden. Wurde der Fahrstreifenwechsel bei Henning u. a. (2008) nahezu jedes Mal mit dem Fahrtrichtungsanzeiger angezeigt, so findet Olsen (2003) eine Quote von etwa 64 %. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Fahrversuche in einem Fall im europäischen und im anderen Fall im nordamerikanischen Verkehrsraum durchgeführt wurden. Außerdem kann das Versuchsdesign großen Einfluss auf das Verhalten der Probanden haben.<sup>10</sup> Für die Dauer zwischen dem ersten Blick in den Außenspiegel und dem Fahrstreifenwechsel finden Henning u. a. (2008) durchschnittlich 6,1 s (Standardabweichung  $\sigma = 7$  s), für die Zeit zwischen Einschalten des Fahrtrichtungsanzeigers und Durchführen des Fahrstreifenwechsels 2,3 s ( $\sigma = 2,2$  s).

Neben fahrzeuginternen Größen simuliert Strassberger (2008) die Kommunikation zwischen Fahrzeugen (*Car2Car*) sowie mit Infrastruktureinrichtungen (*Car2Infrastructure*). Mittels dieser verteilten Informationsaufnahme und probabilistischen Netzen, die die räumlichen und zeitlichen Randbedingungen

---

<sup>10</sup>Es ist davon auszugehen, dass anwesende Versuchsleiter zu einem gesteigerten Pflichtbewusstsein der Probanden führen (Henning u. a. 2008).

fremder Beobachtungen berücksichtigen können, wird die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten gewisser Ereignisse am Beispiel von Regen präzisiert.

Eine erweiterte Verwendung von Ortung und digitalen Karten wird von **Schraut (2000)** vorgestellt. In der Vergangenheit gefahrene Strecken werden dazu verwendet, Schlussfolgerungen auf die zukünftige Route anzustellen. Im Speziellen wird versucht, Wahrscheinlichkeiten für Abbiegemanöver zu ermitteln.

### **Situationsanalyse zur Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle**

Im Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstelle wurde von **Färber (2005)** ein System vorgestellt, um Meldungen an den Fahrer zu passenden Zeitpunkten auszugeben, d. h. Phasen hoher Belastung zu vermeiden. Die Bestimmung geeigneter Zeitpunkte erfolgte dabei mittels eines logischen Systems. Neben Informationen über Regeleingriffe des ABS oder ESP wurden z. B. Pedalbetätigungen ausgewertet.

Von **Klanner u. a. (2008)** werden HMI-Aspekte eines Abbiegeassistenzsystems untersucht. Durch Ortungssysteme in den beteiligten Fahrzeugen und direkte bzw. indirekte Kommunikation über eine Infrastruktureinrichtung werden Gefahrenpotentiale ermittelt. Der Abbiegewunsch des Fahrers wird mittels probabilistischer Netze identifiziert.

Von **Sato und Akamatsu (2008)** wird die Fahrsituation *Rechtsabbiegen an einer Kreuzung*<sup>11</sup> untersucht. Ziel ist es, adäquate Zeitpunkte für Ausgaben des Navigationssystems zu finden und dabei Objekte sowohl vor als auch hinter dem eigenen Fahrzeug in Betracht zu ziehen. Zur Situationsanalyse wird hier ein Strukturgleichungsmodell (siehe z. B. **Pearl 1998**) verwendet.

### **Situationsanalyse für Bahnführungssysteme**

Die Notwendigkeit, Fahrerassistenzsysteme dem Wunsch des Fahrers anzupassen, wird unter anderem bei Systemen zur Kollisionsvermeidung im Längsverkehr deutlich. **Stämpfle und Branz (2008)** beschreiben das Dilemma, das bei der Entwicklung solcher Systeme entsteht: Eine konservative Auslegung führt zu wenigen Fehlauflösungen, reduziert jedoch den Nutzen wegen später Auslösezeitpunkte. Eine progressive Abstimmung führt wegen früher Reaktionen zu einem größeren Nutzen, birgt jedoch die Gefahr einer höheren Anzahl an Fehlalarmen. **McCall und Trivedi (2007)** ermitteln in ihren Arbeiten die Fahrerabsicht *Bremsen* mittels probabilistischer Netze, um diese für Bremsassistenzsysteme zu nutzen. Dabei werden die Größen *Kritikalität der Situation* (d. h. objektive Notwendigkeit eines Bremsmanövers) und *Absicht*

<sup>11</sup> Dabei ist zu beachten, dass die Versuche in Japan, d. h. im Linksverkehr, durchgeführt wurden.

des Fahrers zu bremsen ermittelt. Für die Kritikalität und Fahrerabsicht wird in diesem Zusammenhang bedingte Unabhängigkeit angenommen.<sup>12</sup> Die Kritikalität der Situation wird durch Beobachtung des Fahrzeugs und des Umfelds bestimmt. Die Absicht des Fahrers zu bremsen wird durch direkte Fahrerbeobachtung mittels Kameras, die auf Kopf und Füße gerichtet sind, ermittelt.

Um frühzeitig auf das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer reagieren zu können, wurde in Rahmen von INVENT eine prädiktive Situationserkennung für das Projekt *Stauassistent* untersucht. Dazu wird in [Zavrel u. a. \(2004\)](#) die Dempster-Shafer-Evidenztheorie (siehe Abschnitt 4.2.2) eingesetzt, um aus den unsicheren Informationen über den Bewegungszustand andere Verkehrsteilnehmer Hypothesen über ihr zukünftiges Verhalten aufzustellen. Durch Analyse der relevanten Hypothesen<sup>13</sup> werden Entscheidungen für die eigene Fahrzeugregelung getroffen.

In [Fecher \(2005\)](#) wird das Folgeverhalten von Fahrzeugführern untersucht. Es werden Vorschläge erarbeitet, wie die von einem ACC-System einzuhaltende Zeitlücke in Abhängigkeit der Sichtbedingungen, dem Straßentyp und gegebenenfalls des Fahrstreifens angepasst werden kann.

Die Daten von Navigationssystemen können dazu verwendet werden, das Verhalten von ACC-Systemen zu beeinflussen. So kann die Anzahl der Fahrstreifen je Fahrtrichtung dazu genutzt werden, die Zielauswahl zu verbessern ([Brandstätter u. a. 2003](#); [Prestl und Proemm 2003](#)). Auf kurvigen Landstraßen können Objekte in einem breiten Bereich als Zielfahrzeuge berücksichtigt werden. Auf diese Weise kann eine stabilere Zielverfolgung erreicht werden. Auf Autobahnen mit mehreren Fahrstreifen und großen Kurvenradien (z. B. Autobahnen) ist ein entsprechend schmaler Bereich sinnvoll. Bei der Verwendung von Navigationsdaten ist darauf hinzuweisen, dass nicht nur die Ortungssysteme begrenzte Genauigkeit aufweisen, sondern die Daten digitaler Karten darüber hinaus bei Änderungen des Straßennetzes an Gültigkeit verlieren ([Hamberger 1999](#)). In [Brandstätter u. a. \(2004\)](#) wird eine wahrscheinlichkeitsbasierte Verstellung von ACC-Parametern auf Basis von Navigationsdaten vorgestellt. So erwartet der Fahrer beim Verlassen der Autobahn nur eine geringe Dynamik. Die Wahrscheinlichkeit für das Verlassen der Autobahn steigt dabei ab einer gewissen Entfernung zur Ausfahrt und bei aktiviertem Fahrtrichtungsanzeiger.<sup>14</sup>

In [Freyer u. a. \(2007\)](#) wird ein modifiziertes ACC-System vorgestellt, das ein

<sup>12</sup>Solche Systeme nennt man *naive* Bayes-Systeme, siehe dazu Abschnitt 4.3

<sup>13</sup>Hypothesen werden als relevant bezeichnet, wenn ihre Plausibilität einen Schwellwert überschreitet.

<sup>14</sup>Dabei ist zu beachten, dass es auch bei Rechtsverkehr Ausfahrten nach links gibt ([Brandstätter u. a. 2004](#)).

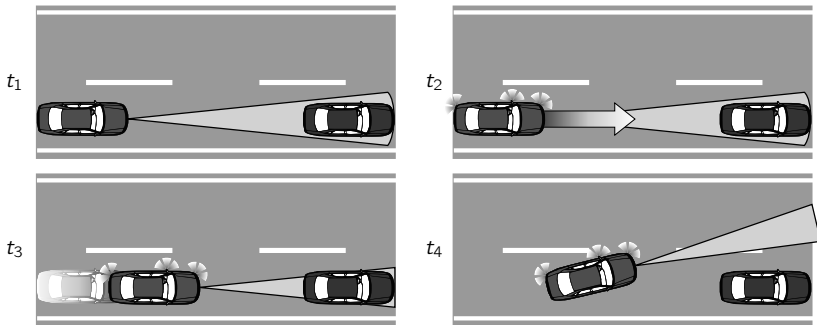


Abbildung 2.5: Anpassung eines ACC-Systems, Konstantfahrt ( $t_1$ ), Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers und Beschleunigung innerhalb des Fahrstreifens ( $t_2 - t_3$ ) zur Vorbereitung des Fahrstreifenwechsels ( $t_4$ )

besseres Verhalten bei Fahrstreifenwechseln zeigt. Dabei werden Daten des eigenen Fahrzeugs sowie der Umwelt und anderer Objekte verwendet. Für die Fahrstreifenwechselmotivation wird ein gewichteter Mittelwert aus Eigengeschwindigkeit, Differenzgeschwindigkeit des Vorderfahrzeugs, Wunschgeschwindigkeit, Abstand zum Vorderfahrzeug, Beschleunigung des Vorderfahrzeugs, eingestellter Zeitlücke und den zeitlichen Ableitungen dieser Werte herangezogen. Darüber hinaus werden Navigations- und Fahrstreifendaten ausgewertet.

In [Dagli \(2005\)](#) werden in den eigenen Fahrstreifen einscherende Fahrzeuge untersucht. Dabei werden probabilistische Netze verwendet, da [Dagli](#) feststellt, dass die Beobachtung einzelner Situationsmerkmale notwendig aber nicht hinreichend zur Erkennung von Manövern ist. Anhand der erkannten Manöver wird die Relevanz von Fahrzeugen für ein ACC-System angepasst. Hierfür ist eine erweiterte Sensorik notwendig, die auch Fahrzeuge in Nachbarfahrstreifen selbst bei geringem Abstand verfolgen kann. Als Sensor wird dabei ein prototypischer Laserscanner eingesetzt.

[Zlocki](#) untersucht in seinen Arbeiten rein längsdynamische Manöver zur Anpassung einer Fahrzeuglängsregelung ([Zlocki 2007, 2008](#)). Er unterscheidet die Zustände *Annähern*, *Anhalten*, *Anfahren*, *Stehen*, *Freifahrt* und *Folgen*. Durch Kombination dieser Zustände entstehen 17 Situationen, die erkannt werden. Neben serienmäßig eingebauten Fahrzeugsensoren wird eine digitale Karte verwendet, die Informationen über Kurvenradien, Kreuzungen und



Geschwindigkeitsbeschränkungen enthält.

In [Ehmanns u. a. \(2003\)](#) wird ein integriertes Längs- und Querführungssystem vorgeschlagen, bei dem mittels des Fahrtrichtungsanzeigers auf die Fahrerabsicht geschlossen wird. Inzwischen im Serieneinsatz befinden sich ACC-Systeme, bei denen ein aktivierter linker Fahrtrichtungsanzeiger zu einer Dynamikverstellung des Reglers und Beschleunigen innerhalb des eigenen Fahrstreifens führen kann, um ein Überholmanöver vorzubereiten ([Steinle u. a. 2006](#)). Abbildung 2.5 veranschaulicht dieses Verhalten.

Der Stand der Technik zeigt, dass der Situationsanalyse im Bereich der Fahrzeugsysteme große Bedeutung beigemessen wird. Dabei kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz, die oft nicht gegeneinander abgegrenzt werden. Tabelle 2.2 fasst einzelne Aspekte der referenzierten Arbeiten zusammen und stellt sie dieser Arbeit gegenüber. Es wird deutlich, dass viele Arbeiten keine konkrete Anwendbarkeit auf das Gebiet der Fahrerassistenzsysteme berücksichtigen. Für die Arbeiten mit Bezug zu ACC-Systemen liegt der Schwerpunkt der behandelten Manöver auf Fahrstreifenwechseln des eigenen Fahrzeugs sowie Fremdfahrzeugen.

## 2.5 Fahrzeuglängsführung

Das in dieser Arbeit fokussierte Assistenzsystem nimmt allein Einfluss auf die Fahrzeuglängsführung. Wesentliche Anforderungen dabei sind die Sicherheit der Fahrzeugbewegung sowie die komfortable Regelung ([Schnieder 2007](#)). Die Aufgabe der automatisierten Längsführung kann in folgende wesentliche Schritte unterteilt werden:

1. Detektion von Objekten, gegebenenfalls Fusion von Sensordaten (Umfelderfassung)
2. Auswahl eines relevanten Vorderfahrzeugs (Zielauswahl)
3. Regelung des Fahrzeugs durch Ansteuerung des Antriebsstrang und des Getriebes
4. Mensch-Maschine-Schnittstelle (z. B. Anzeige des aktuellen Systemzustands)

Abbildung 2.6 gibt einen Überblick über das Längsführungssystem. Das in der Zielauswahl als relevant identifizierte Objekt sowie Fahrereingaben (z. B. Wunschgeschwindigkeit des Fahrers oder einzuhaltender Abstand zu Vorderfahrzeugen) werden der Längsregelung zugeführt. Diese teilt sich in einen

	Zeller	Blaschke u. a.	Gerdes	Cheng und Trivedi	McCall u. a.	Henning u. a.	Strassberger	Schraut	Färber	Klanner u. a.	Sato und Akamatsu	McCall und Trivedi	Zavrel u. a.	Fecher	Brandstätter u. a.	Freyer u. a.	Dagli	Zlocki	Ehmanns u. a.	Schroven
Anwendung																				
Ohne Anwendung	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X								
HMI																				
FAS ohne ACC												X								
FAS: ACC													X	X	X	X	X	X	X	X
Manöver																				
Anhalten/Bremsen																				
Abbiegen/Ausfahren																				
Folgen																				
Fahstreifenwechsel Ego	X	X	X		X	X														
Fahstreifenwechsel Obj.	X																			
keine Manöver																				
Datenquellen																				
Fahrzeugdaten		X	X			X														
Umfeldsensoren		X	X																	
Digitale Karte		X																		
Kommunikation																				
Fahrerbeobachtung		X	X	X	X															

Tabelle 2.2: Übersicht zu referenzierten Arbeiten zur Situationsanalyse

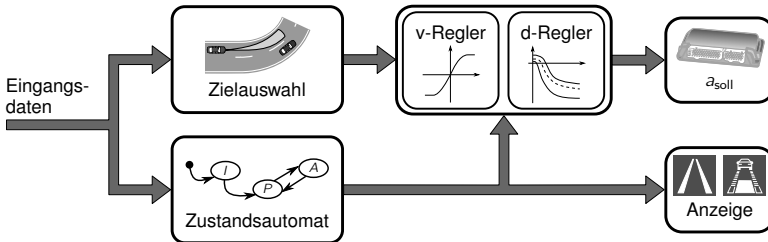


Abbildung 2.6: Struktur des Längsführungssystems mit Ausgabegrößen zur Aktorikbeeinflussung und Fahreranzeige

Geschwindigkeits- und einen Abstandsregler auf. Schließlich werden die Fahrzeugaktuatorik sowie Anzeigen bzw. akustische Signale angesteuert.

Bei der Zielauswahl werden von der Sensorik erkannte Objekte hinsichtlich ihrer Relevanz für die Längsregelung des Fahrzeugs bewertet. Wird ein relevantes Objekt im zukünftigen Fahrweg erkannt, wird es als Zielobjekt für die Regelung markiert. Zur Objektdetektion werden in Seriensystemen üblicherweise Radar- und Lidarsensoren (siehe Abschnitt 2.2) eingesetzt. Die gelieferten Objektdaten beziehen sich auf ein lokales Koordinatensystem des eigenen Fahrzeugs und haben zunächst keinen Bezug zum Fahrbahnverlauf. Im Fall einer nichtgekrümmten Fahrbahn ist die Bestimmung des relevanten Objekts wenig komplex. Im Fall einer Kurvenfahrt sind jedoch nicht die Objekte entlang der Fahrzeuiglängsachse relevant, sondern diejenigen, die sich innerhalb des eigenen Fahrstreifens befinden. Zur Ermittlung der aktuellen Fahrspurkrümmung werden in der Regel folgende fahrzeuginterne Größen verwendet (Saeger und Landsiedel 1998; Winner 2002; Du u. a. 2007):

- Gierwinkelgeschwindigkeit
- Querbewegung
- Lenkwinkel
- Raddrehzahlen
- Fahrgeschwindigkeit

Verfahren zur Zielauswahl, die allein auf diesen Größen beruhen, können Schwächen bei der Prädiktion des Fahrstreifenverlaufs aufweisen, wenn sich das eigene Fahrzeug noch auf einem geraden Straßenabschnitt befindet, Vorderfahrzeuge jedoch bereits eine Kurve durchfahren. Da das eigene Fahrzeug

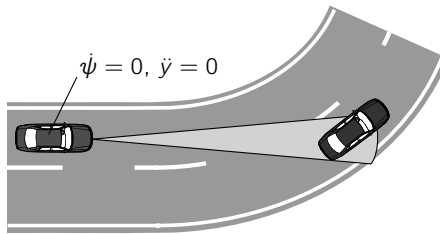


Abbildung 2.7: Anspruchsvolle Situationen hinsichtlich der Auswahl eines relevanten ACC-Ziels bei alleiniger Verwendung eines objektgebenden Sensors und auf Fahrzeugdaten basierender Fahrstreifenprädiktion

noch keine Gierwinkelgeschwindigkeit ( $\dot{\psi}$ ) bzw. Querbeschleunigung ( $\ddot{\gamma}$ ) aufweist, wird zunächst von einem geraden Streckenverlauf ausgegangen. Wie in [Abbildung 2.7](#) dargestellt kann dies bei einer vorausliegenden Linkskurve zu Bremseingriffen führen, wenn in der Verlängerung der Fahrzeuglängsachse ein langsames Fahrzeug detektiert wird. Aus diesem Grund wurde anfangs vermutet, dass ACC-Systeme nicht ohne Sensorik zur Erkennung von Fahrstreifenmarkierungen auskommen würden ([Behringer 1997](#)). Tatsächlich arbeitet die Zielauswahl heutiger ACC-Systeme in der Regel ohne eine direkte Erkennung des Fahrbahnverlaufs. Stattdessen wird aus der Beobachtung von kollektiven Vorderfahrzeugbewegungen sowie stehenden Objekten eine prädiktive Erkennung der Fahrstreifenkrümmung realisiert ([Hofmeyer 1999](#)). Dabei werden folgende Annahmen zugrunde gelegt: Wenn beobachtet wird, dass sich mehrere Vorderfahrzeuge in eine Richtung bewegen, wird auf einen entsprechenden Trassenverlauf geschlossen. Die Krümmungsprädiktion anhand stationärer Objekte basiert auf der Annahme, dass die Fahrbahn von derartigen Objekten, z. B. Schutzplanken auf Autobahnen, begrenzt wird.

Für die Regelung bei einem ACC-System müssen zwei wesentliche Betriebszustände unterschieden werden:

**Folgefahrt** (*follow mode*) Als Folgefahrt bezeichnet man das Fahren hinter einem relevanten Vorderfahrzeug. Die entscheidenden Regelgrößen sind der Abstand zum Zielobjekt sowie die Relativgeschwindigkeit bezüglich des Zielobjekts.

**Freifahrt** (*free mode*) Die Fahrt ohne ein relevantes Vorderfahrzeug wird Freifahrt genannt. Dabei wird die vom Fahrer eingestellte Wunschgeschwindigkeit eingeregelt.

Zur Realisierung einer automatisierten Längsregelung werden daher ein Geschwindigkeits- sowie ein Abstandsregler benötigt. Um Einfluss auf die Längsbewegung des Fahrzeugs nehmen zu können, verfügt das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Experimentalfahrzeug (Abschnitt 5.2.2) über eine Schnittstelle, welche Sollbeschleunigungen entgegennimmt. Der eingesetzte Längsregler beruht auf der Arbeit von Eigel (2010) und wird im Rahmen dieser Arbeit erweitert, sodass sich ein situationsadaptives Reglerverhalten realisieren lässt.

### 2.5.1 Geschwindigkeitsregelung

Für den Fall der ungestörten Fahrt wird die Fahrzeuggeschwindigkeit auf einen vom Fahrer eingestellten Wert geregelt. Die Regelstrecke besteht aus zwei Komponenten: der Aktordynamik (Beschleunigungsregler) und dem kinematisch bedingten Integrator. Insgesamt weist die Strecke somit integrierendes Verhalten auf. Zur Regelung ohne stationäre Regelabweichung genügt bei einem solchen Streckenverhalten ein Proportionalregler. Dieser führt der Strecke lediglich eine Verstärkung der Regelabweichung (Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v$ ) zu:

$$a_{\text{soll}} = V_v \Delta v$$

Bei einem konstanten Verstärkungsfaktor  $V_v$  würden große Abweichungen von der Wunschgeschwindigkeit jedoch zu unkomfortabel großen Beschleunigungen führen. Deshalb ist der Geschwindigkeitsregler als nichtlinearer Kennlinienregler realisiert (Abbildung 2.8). Für positive und negative Stellgrößen wurden die Beschränkungen  $a_{\text{max}}^+$  als maximale Beschleunigung und  $a_{\text{max}}^-$  als maximale Verzögerung eingeführt. Die entsprechenden Geschwindigkeitsdifferenzen  $\Delta v_{a^+}$  bzw.  $\Delta v_{a^-}$  ab denen die maximalen Eingriffe erfolgen sind Parameter des Geschwindigkeitsreglers.

Für den Verzögerungsfall wurde eine lineare Interpolation zwischen den Punkten  $(\Delta v_{a^-}, a_{\text{max}}^-)$  und  $(0, 0)$  um ein Plateau zwischen  $\Delta v_{s1}$  und  $\Delta v_{s2}$  erweitert. In diesem Bereich ist die Verzögerungsanforderung  $a_s^-$  wirksam. Dadurch wird in diesem Bereich ein aktiver Bremseneingriff vermieden, was zu einem erhöhten Fahrkomfort führt.

Bei positiven Regelabweichungen, d. h. einer zu geringen Fahrzeuggeschwindigkeit, führt eine proportionale Verstärkung zwischen  $\Delta v = 0$  und  $\Delta v_{a^+}$  zu einem langsamen Annähern an die Wunschgeschwindigkeit. Um dieses Verhalten zu vermeiden, wurde der lineare Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsdifferenz und Sollbeschleunigung mit einer Sinus-Halbwellen mit parametrierbarer Amplitude überlagert.

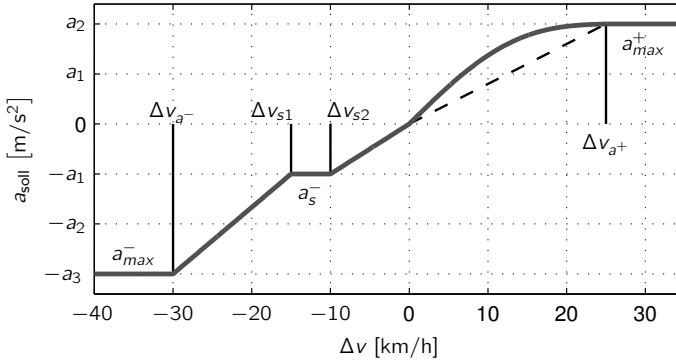


Abbildung 2.8: Kennlinie des Geschwindigkeitsreglers, Sollbeschleunigung  $a_{soll}$  als Funktion der auszuregelnden Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v$  (Eigel 2010)

## 2.5.2 Abstandsregelung

Sobald die Fahrt durch ein Vorderfahrzeug gestört wird, dessen Geschwindigkeit geringer als die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers ist, soll ein vom Fahrer beeinflussbarer Abstand eingehalten werden. Da der eingesetzte Abstandsregler im Zustandsraum entworfen wird, soll dieser zunächst formal eingeführt werden.

### Einführung in die Zustandsraumbetrachtung

Betrachtet man allein für das eigene Fahrzeug die Zustandsgrößen Position in Längsrichtung  $x_{Ego}$  und Geschwindigkeit  $v_{Ego}$ , gelten bei gegebener Beschleunigung  $a_{Ego}$  die kinematischen Zusammenhänge

$$v_{Ego}(t) = \int a_{Ego}(t) dt + v_{Ego,0} , \quad (2.1)$$

$$x_{Ego}(t) = \iint a_{Ego}(t) dt dt + v_{Ego,0} t + x_{Ego,0} \quad (2.2)$$

mit der Anfangsgeschwindigkeit  $v_{Ego,0}$  und der Anfangsposition in Längsrichtung  $x_{Ego,0}$  als Integrationskonstanten. Ein einfacher Fall ergibt sich für:

$$a_{Ego} = \text{const} \quad v_{Ego,0} = 0 \text{ m/s} \quad x_{Ego,0} = 0 \text{ m}$$

Die Gleichungen (2.1) und (2.2) vereinfachen sich dann zu

$$v_{\text{Ego}}(t) = a_{\text{Ego}} t , \quad (2.3)$$

$$x_{\text{Ego}}(t) = \frac{1}{2} a_{\text{Ego}} t^2 . \quad (2.4)$$

Löst man Gleichung (2.3) nach  $a_{\text{Ego}}$  auf und setzt das Ergebnis für  $a_{\text{Ego}} \neq 0$  in Gleichung (2.4) ein, ergibt sich die Zustandsraumdarstellung, die nicht mehr explizit von der Zeit  $t$  abhängig ist. Nach weiteren Umformungen ergibt sich der hier relevante Teil der Lösung zu:

$$v_{\text{Ego}}(x_{\text{Ego}}) = \sqrt{2x_{\text{Ego}} a_{\text{Ego}}} . \quad (2.5)$$

Gleiche Betrachtungen können für ein zweites Fahrzeug, das vor dem eigenen Fahrzeug fährt, angestellt werden. Es gelten mit einer Beschleunigung  $a_{\text{Obj}}$  die kinematische Beziehungen analog zu den Gleichungen (2.1) und (2.2):

$$v_{\text{Obj}}(t) = \int a_{\text{Obj}}(t) dt + v_{\text{Obj},0} , \quad (2.6)$$

$$x_{\text{Obj}}(t) = \iint a_{\text{Obj}}(t) dt dt + v_{\text{Obj},0} t + x_{\text{Obj},0} . \quad (2.7)$$

Durch Differenzbildung ergeben sich die für die Abstandsregelung zentralen relativen Zustandsgrößen Abstand  $\Delta x$  und Relativ- oder auch Differenzgeschwindigkeit  $\Delta v$ :

$$\Delta v = v_{\text{Obj}}(t) - v_{\text{Ego}}(t) \quad (2.8)$$

$$\Delta x = x_{\text{Obj}}(t) - x_{\text{Ego}}(t) \quad (2.9)$$

Durch diese Größen wird der Zustandsraum der Relativgrößen zur Abstandsregelung aufgespannt. Abbildung 2.9 zeigt die zeitlichen Verläufe von Abstand und Relativgeschwindigkeit für ein Szenario, in dem das Vorderfahrzeug zu Beginn der Betrachtung ( $t = 0$ ) einen Abstand von  $\Delta x = 30$  m aufweist und sich mit einer positiven Relativgeschwindigkeit von  $\Delta v = 20$  m/s gleichmäßig entfernt ( $a_{\text{Obj}} = 0$  m/s<sup>2</sup>). Das eigene Fahrzeug beschleunigt konstant mit  $a_{\text{Ego}} = 1 \dots 3$  m/s<sup>2</sup>. Dies führt zu einer konstanten Verringerung der Relativgeschwindigkeit bis sich das Ego-Fahrzeug schneller bewegt als das Vorderfahrzeug ( $\Delta v \leq 0$ ). Der Abstand zwischen den Fahrzeugen wächst zunächst langsamer und verringert sich ab dem Moment des Vorzeichenwechsels der Relativgeschwindigkeit. Negative Abstände bedeuten, dass das Vorderfahr-

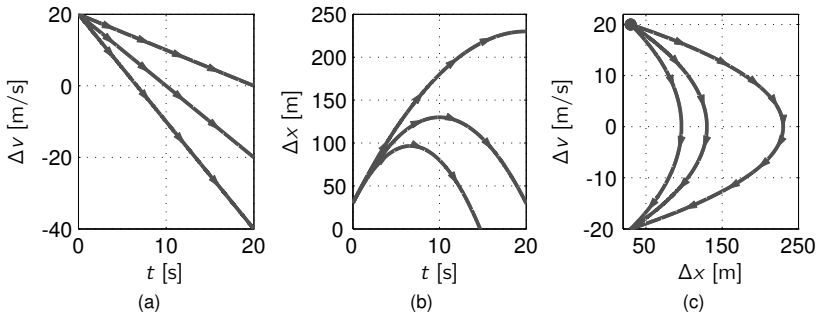


Abbildung 2.9: Zeitlicher Verlauf von Relativgeschwindigkeit (a) und Abstand (b) sowie die Phasenraumdarstellung (c) für ein konstant beschleunigendes Fahrzeug ( $a_{\text{Ego}} = 1 \dots 3 \text{ m/s}^2$ ) mit anfänglich schnellerem Vorderfahrzeug

zeug überholt wurde. In der Phasenraumdarstellung erkennt man, dass solche Annäherungsmanöver durch nach links geöffnete Parabeln repräsentiert werden. Stärkere Beschleunigungen führen dabei zu flacheren Parabeln.

### Sliding-Mode-Regelung im Zustandsraum

Das Prinzip der Sliding-Mode-Regelung soll im Folgenden direkt am Beispiel der Abstandsregelung für den beschriebenen zweidimensionalen Zustandsraum erläutert werden. Kern der Sliding-Mode-Regelung ist die Vorgabe einer Schalfunktion, welche die angestrebte Dynamik des Systems beschreibt. Wird die Regelung derart ausgelegt, dass der Systemzustand der vorgegebenen Dynamik folgt, spricht man von einem Gleitzustand (*sliding mode*).

Abbildung 2.10 zeigt den Einfluss einer Sliding-Mode-Regelung und die Auswirkungen auf den Systemzustand. Die Größe  $\Delta \hat{x}$  bezeichnet dabei die Abweichung vom Sollabstand zu einem Vorderfahrzeug. Die Anfangsbedingungen des Manövers entsprechen qualitativ denen aus Abbildung 2.9: Vor dem geregelten Fahrzeug befindet sich ein schnelleres Objekt, das sich entfernt. Als Schalfunktion sei zunächst ein linearer Zusammenhang angenommen:

$$\Delta v_{\text{switch}} = m \cdot \Delta \hat{x} . \quad (2.10)$$

Die Bewegung entlang der Schalfunktion in den Ursprung entspricht einer



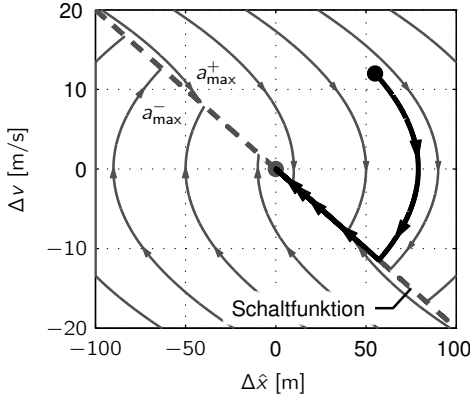


Abbildung 2.10: Beispielhafte Systemtrajektorie (schwarz) im Phasenraum unter Einfluss einer Sliding-Mode-Regelung

von Betrag exponentiell abnehmenden Beschleunigung.<sup>15</sup> Der Zustandsraum wird durch die Schaltfunktion in zwei Bereiche unterteilt. Zur Bestimmung der Stellgröße  $a_{\text{soll}}$  erfordert die Sliding-Mode-Regelung die Angabe eines Regelgesetzes. Dieses lautet hier:

$$a_{\text{soll}}(\Delta\hat{x}, \Delta v) = \begin{cases} a_{\text{max}}^+ & \text{für } \Delta v > \Delta v_{\text{switch}}(\Delta\hat{x}) \\ 0 & \text{für } \Delta v = \Delta v_{\text{switch}}(\Delta\hat{x}) \\ a_{\text{max}}^- & \text{für } \Delta v < \Delta v_{\text{switch}}(\Delta\hat{x}) \end{cases} \quad (2.11)$$

Das Regelgesetz besagt, dass das geregelte Fahrzeug konstant mit  $a_{\text{max}}^+$  beschleunigt soll, solange sich der Systemzustand oberhalb der Schaltgerade befindet. Unterhalb der Schaltfunktion verzögert das Fahrzeug mit  $a_{\text{max}}^-$ . Wenn der Systemzustand auf der Schaltgerade liegt, gilt  $a_{\text{soll}} = 0$ . Das Regelgesetz bewirkt, dass der Systemzustand von beiden Seiten auf die Schaltfunktion geführt wird. Nach erstmaligem Erreichen der Schaltfunktion kommt es zu einem hochfrequenten Wechsel der Stellgröße und der Systemzustand folgt der Schaltfunktion. Bei der idealen Sliding-Mode-Regelung wird von einer unendlich kurzen Schaltzeit des Stellglieds ausgegangen. Endliche Stellzeiten realer Aktoren werden vernachlässigt. Darüber hinaus ist durch das Um-

<sup>15</sup>Wenn der Systemzustand der Schaltfunktion entspricht, muss zur Beschreibung der Dynamik eine Differentialgleichung der Form  $\dot{x} = mx$  gelöst werden. Dies führt zu einem exponentiellen Zusammenhang.

schalten zwischen den diskreten Stellgrößen  $a_{\max}^+$  und  $a_{\max}^-$ , d.h. konstantem Beschleunigen und konstantem Bremsen, keine komfortable Regelung eines Fahrzeugs möglich. Diese Unzulänglichkeiten können durch die Einführung einer Grenzschrift um die Schaltfunktion in Verbindung mit einem kontinuierlichen Regelgesetz überwunden werden. Außerhalb der Grenzschrift gilt das Regelgesetz unverändert. Zwischen den Rändern der Grenzschrift und der Schaltfunktion wird die Stellgröße linear interpoliert.

Gegenüber dem einführenden Beispiel sollte die Form der Schaltfunktion angepasst werden. Eine Gerade mit konstanter Steigung ist aus folgenden Gründen zur Abstandsregelung ungeeignet:

- Bei Annäherungen aus großer Entfernung werden hohe negative Relativgeschwindigkeiten aufgebaut, die durch entsprechend starke bzw. frühe Bremsenriffe kompensiert werden müssen.
- Auf einsicherende Fahrzeuge mit positiver Relativgeschwindigkeit wird durch Bremsenriffe reagiert sobald der Sollabstand geringfügig unterschritten wird.

Ein solches Verhalten kann durch eine Schaltfunktion vermieden werden, die sowohl im Bereich geringer negativer als auch großer positiver Abweichungen vom Sollabstand flach verläuft. Dies kann durch einen Geradenabschnitt erreicht werden, an den sich parabelförmige Abschnitte stetig anschließen.

Abbildung 2.11 zeigt eine Aufteilung des Phasenraums, die sich aus den genannten Modifikationen ergibt. Das Beispiel zeigt eine Annäherung des geregelten Fahrzeugs mit 130 km/h an ein Vorderfahrzeug, das konstant mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h ( $\Delta v = -50$  km/h) fährt. Der Phasenraum wird in vier Bereiche aufgeteilt. Die Bereiche werden von der Schaltfunktion (III) und den hier als Grenzfunktionen (I, II, IV, V) bezeichneten Bereichsgrenzen gebildet. Jede Grenzfunktion entspricht einem Sollbeschleunigungswert. Zwischen den Grenzfunktionen werden die Beschleunigungsvorgaben linear interpoliert. Im einzelnen haben die Grenzfunktionen bzw. -schichten folgende Aufgaben:

- Äußere positive Grenzfunktion:* Wenn der Systemzustand im Phasenraum oberhalb dieser Grenze liegt, erfolgt der maximale positive Eingriff  $a_{\text{soll}} = a_{\max}^+$ .
- Innere positive Grenzfunktion:* An dieser Grenzfunktion gilt  $a_{\text{soll}} = 0$ . Damit wird innerhalb der inneren positiven Grenzschrift (II-III) nicht weiter beschleunigt und es erfolgt eine Annäherung mit konstanter Geschwindigkeit. In dieser Ausprägung ist die Grenzfunktion nur für  $\Delta x > \Delta x_{\text{soll}}$

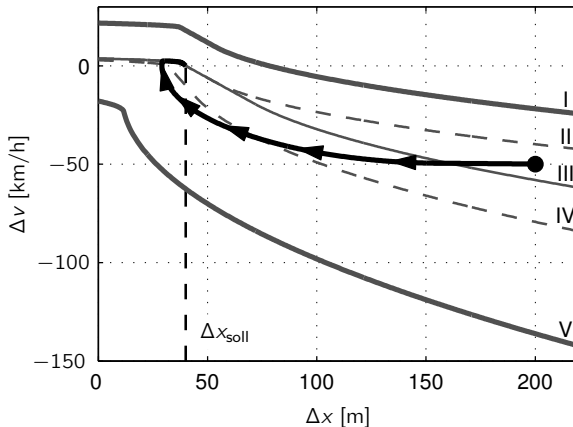


Abbildung 2.11: Sliding-Mode-Regelung mit stetigem Regelgesetz und jeweils zwei positiven und negativen Grenzschichten (Beispieltrajektorie: Annäherungsmanöver an ein langsames Vorderfahrzeug)

relevant.

- III *Schaltkurve*: An der Schaltkurve wird zwischen Beschleunigen und Verzögern bzw. zunächst  $a_{\text{soll}} = 0$  umgeschaltet.
- IV *Innere negative Grenzfunktion*: Sie teilt den Bereich negativer Sollbeschleunigungen, um einerseits frühzeitig, jedoch sanft, auf Vorderfahrzeug reagieren zu können (III-IV). Andererseits werden stärkere Eingriffe in der äußeren negativen Grenzschicht (IV-V) vorgenommen, wenn die Situation es erfordert.
- V *Äußere negative Grenzfunktion*: Liegt der Systemzustand im Zustandsraum unterhalb dieser Grenze, erfolgt der maximale Bremsingriff, d. h.  $a_{\text{soll}} = a_{\text{max}}^-$ .

Mit den verschiedenen Grenzschichten und dem stetigen Schaltgesetz ist eine komfortable Abstandsregelung möglich. Durch das nichtlineare Schaltgesetz wird ein kontinuierlicher Stellgrößenverlauf erreicht.



## Kapitel 3

# Vorgehen zur Entwicklung neuartiger Fahrerassistenzsysteme

Program testing can be a very effective way to show the presence of bugs, but it is hopelessly inadequate for showing their absence.

---

*(Edsger W. Dijkstra, 1972)*

In diesem Kapitel wird ein Vorgehen zur Entwicklung neuer Fahrerassistenzsysteme in der anwendungsnahen Forschung dargestellt. Fragestellungen, die ausschließlich für die Entwicklung zur Großserienproduktion relevant sind, beispielsweise die Erprobung unter extrem niedrigen bzw. hohen Temperaturen, werden nicht behandelt. Im Entwicklungsprozess werden hier die Aktivitäten Analyse, Entwurf, Implementierung und Test unterschieden. Nicht zuletzt aufgrund des Forschungscharakters und der damit einhergehenden Unsicherheit bezüglich einzelner Projektphasen werden diese Aktivitäten mehrfach durchgeführt und die Ergebnisse in Iterationen verfeinert.

Abschnitt 3.1 zeigt verschiedene Ansatzpunkte anhand derer neuartige Assistenzsysteme abgeleitet werden können.

Abschnitt 3.2 gibt einen Überblick zur Systemanalyse. Dazu gehören die Anforderungsanalyse unter Berücksichtigung verschiedener Interessensgruppen sowie die Systemmodellierung.

Abschnitt 3.3 erläutert die Randbedingungen beim Entwurf von Fahrzeugsystemen im Bereich der Forschung. Dabei wird auf verschiedene Entwurfsaspekte des Gesamtsystems eingegangen.

In Abschnitt 3.4 werden unterschiedliche verbreitete Konzepte zur Implementierung von Fahrerassistenzsystemen dargestellt.

Abschnitt 3.5 beschreibt verschiedene Methoden zum Test der erstellten Soft-

ware. Diese umfassen sowohl Simulationen und Testfahrten in einem Experimentalfahrzeug als auch die Kombinationen beider Methoden.

### 3.1 Systemdefinition

Bei der Entwicklung im Bereich der Fahrerassistenzsysteme sollen zunächst folgende Varianten von Systemen unterschieden werden:

**Weiterentwicklung** Ein bereits bekanntes System wird bezüglich eines Systemmerkmals (z. B. Geschwindigkeitsbereich, in dem das System verfügbar ist) erweitert. Beispiel: Automatische Distanzregelsysteme hatten anfangs einen typischen Einsatzbereich von 30–180 km/h. Die untere Geschwindigkeitsgrenze wurde bei ACC Follow-To-Stop-Systemen auf 0 km/h reduziert.

**Neuentwicklung** Wenn ein System nicht nur erweitert wird, sondern eine neuartige Funktion zur Verfügung stellt, spricht man von einer Neuentwicklung. Beispiel: Parkassistenzsysteme beschränkten sich lange Zeit auf eine optisch oder akustische Rückmeldung über den Abstand zu einem Hindernis vor bzw. hinter dem eigenen Fahrzeug. Der Parkvorgang war stets vom Fahrer durchzuführen. Im Jahr 2006 wurden Einparkassistenzsysteme in Serienfahrzeugen eingeführt, die semiautomatisch einparken (Schöning u. a. 2006).<sup>1</sup>

Insbesondere für den Bereich der Neuentwicklungen gibt es verschiedene Ansätze, um neuartige Fahrerassistenzsysteme zu definieren. Dabei kann man zwei Herangehensweisen voneinander abgrenzen, deren Bezeichnung auch in anderen Domänen zur Anwendung kommen: Top-Down-Ansatz, Bottom-Up-Ansatz. Als *Top-Down-Ansatz* soll hier eine durch den Kfz-Hersteller bzw. einen Zulieferer getriebene Entwicklung verstanden werden. Dafür kann es verschiedene Auslöser geben. Einerseits kann die Entwicklung eines Fahrerassistenzsystems durch eine Preisveränderung für erforderliche Komponenten hervorgerufen werden. So führte u. a. der fallende Preis für optische Systeme dazu, dass heute in Serienfahrzeugen schon mehrere Kamerasysteme für verschiedene Zwecke verwendet werden (z. B. Rückfahrkamera für Parkvorgänge, Frontkamera für Spurhaltesysteme). Zum anderen kann durch technologischen Fortschritt im Bereich der Sensorik eine Funktion realisiert werden, die zuvor wegen fehlender Daten nicht realisiert werden konnte. Als

---

<sup>1</sup> Der Fahrzeugführer bedient lediglich Gas- und Bremspedal, das Assistenzsystem steuert die Lenkanlage.

Beispiel sei eine Querführungsassistentz in Baustellen genannt. Hier muss im Gegensatz zu konventionellen Spurhaltesystemen unstrukturierte Umgebung (Warnbaken, Schrammborden) statt Fahrstreifenmarkierungen erkannt werden. Technologische Weiterentwicklung im Bereich der Fahrzeugaktoris kann bei intervenierenden Assistenzsystemen ebenfalls neue Systeme ermöglichen: Erst die Einführung elektromechanischer Lenkanlagen erlaubte eine kontinuierliche fahrstreifenzentrierte Querführungsfunktion<sup>2</sup>.

Ein Ansatz, mit dem systematisch Fahrerassistenzsysteme abgeleitet werden können, ist die Untersuchung des Unfallgeschehens. Dazu existieren verschiedene Unfalldatenbanken (z. B. **GIDAS 2010**), mit denen Verkehrssituationen identifiziert werden können, in denen sich häufig Unfällen ereignen. Dabei können Datenbankabfragen nach verschiedenen Merkmalen gefiltert werden. So ist es möglich, Unfalltypen mit höchster Verletzungsschwere oder bei bestimmten Lichtverhältnissen (Tag/Nacht) zu identifizieren. Letzteres ist beispielsweise für die Entwicklung von Lichtfunktionen wesentlich. Wenn in den ausgewählten Situationen überwiegend Fahrfehler und keine technischen Mängel ursächlich für den Unfall sind, ist die Entwicklung eines Fahrerassistenzsystems, das den Fahrer in der entsprechenden Situation unterstützt, sinnvoll. Prinzipbedingt ergeben sich aus diesem Vorgehen Assistenzsysteme, welche die Verkehrssicherheit adressieren. Es ist zu beachten, dass trotz eines möglicherweise hohen Wirkpotenzials des Systems die Kundenakzeptanz damit nicht vorhergesagt werden kann. Der objektive Bedarf und die Kaufbereitschaft für ein Assistenzsystem sind für die individuellen Verkehrsteilnehmer häufig entkoppelt.

Mit *Bottom-Up-Ansatz* wird hier ein Vorgehen bezeichnet, bei dem sich das Fahrerassistenzsystem aus den Wünschen und subjektiven Bedürfnissen des Kunden ergibt. Dabei stehen folgende Techniken zur Verfügung:

**Befragung** Zum einen können Kunden direkt nach Systemwünschen oder -veränderungen befragt werden. Außerdem sind indirekte Fragetechniken möglich, in denen nach Fahrsituationen gefragt wird, in denen Fahrer sich entweder langweilen oder unsicher bzw. überfordert fühlen.

**Beobachtung** Statt Fahrer direkt zu befragen, kann ihr Verhalten in verschiedenen Fahrsituationen beobachtet werden. Ebenso kann der Umgang von Fahrern mit bestehenden Assistenzsystemen beobachtet werden. Anhaltspunkte für Weiterentwicklungen eines System können z. B. an-

---

<sup>2</sup>Ein aktive Querführungsfunktion, die lediglich an den Fahrstreifenrändern eingreift, kann ebenfalls über ein elektronisch ansteuerbares Bremssystem realisiert werden. Dabei werden die Räder einer Fahrzeugseite leicht verzögert, sodass ein Giermoment um die Fahrzeughochachse zur verzögerten Seite entsteht.

hand der Situationen gefunden werden, in denen der Fahrer ein System überstimmt oder deaktiviert.

Das Mittel der Befragung bietet die Möglichkeit, konkrete Anregungen für neue Assistenzsysteme zu erhalten. Für im Markt befindliche Systeme ist es vergleichsweise einfach, Anregungen für Erweiterungen zu geben, wenn die Befragten die Systeme kennen oder sogar praktische Erfahrung mit deren Umgang haben. Offene Fragen nach neuartigen Assistenzsystemen sind hingegen schwierig zu beantworten. Beobachtungen des Fahrers können auf verschiedenen Wegen durchgeführt werden. Zum einen können numerische Daten über den Zustand des Fahrzeugs (z. B. Geschwindigkeit), den Status eines Assistenzsystem (z. B. an, aus, übersteuert) oder die Umgebung (Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug) aufgezeichnet werden. Solche Daten stehen häufig ohnehin auf einem Fahrzeugbus zur Verfügung und bedürfen – abgesehen von der Datenaufzeichnungseinrichtung – keiner zusätzlichen Einbauten innerhalb des Fahrzeugs. Eine automatisierte Datenauswertung auf Basis von Klassiermethoden ist möglich. Tiefergehende Analysen des Fahrerverhaltens sind durch die Aufzeichnung von Videodaten möglich, mit der beispielsweise Nebentätigkeiten erfasst werden können. Die Installation von Videokameras und die anschließende Auswertung der Messdaten ist jedoch mit hohem Aufwand verbunden. Sowohl die Aufzeichnung numerischer Daten als auch Analysen mit Hilfe von Videodaten werden z. B. in dem europäischen Projekt euroFOT (European Field Operational Test) angewendet, um das Fahrerverhalten unter Einfluss von Fahrerassistenzsystemen zu untersuchen und Möglichkeiten zur Weiterentwicklung abzuleiten (euroFOT 2010).

## **3.2 Analyse**

Nachdem das Fahrerassistenzsystem in seiner Grundfunktion definiert ist, gilt es, Anforderungen an das System zu sammeln und zu strukturieren. Darüber hinaus werden wesentliche Systemteile unter Berücksichtigung verschiedener Perspektiven auf das System modelliert.

### **3.2.1 Anforderungsermittlung**

Zur Ermittlung von Anforderungen müssen zunächst die beteiligten Parteien identifiziert werden, die Anforderungen an das Fahrzeug im Allgemeinen und an ein Assistenzsystem im Speziellen haben können. Nach Schäuuffele



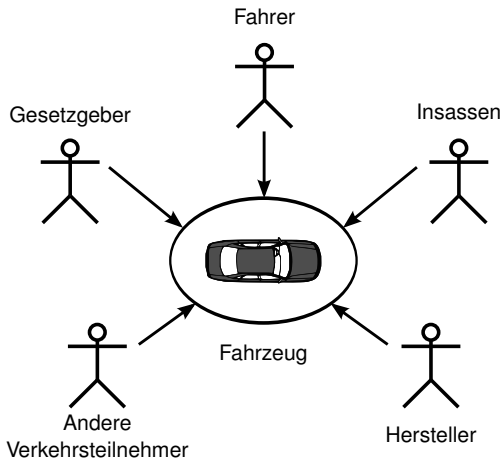


Abbildung 3.1: Benutzergruppen, die Anforderungen an ein Fahrzeug haben können

und Zurawka (2006) gehören dazu folgende Benutzergruppen (siehe auch Abbildung 3.1): Fahrer, Gesetzgeber, Insassen, andere Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer, andere Fahrzeuge) sowie der Fahrzeughersteller.

Es ist offensichtlich, dass der Fahrer als Führer des Fahrzeugs und damit Bediener der meisten Fahrzeugsysteme Anforderungen an ein Fahrerassistenzsystem hat. Dazu gehören insbesondere Aspekte der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Ein Gesichtspunkt ist dabei die Bedienung und hier zu allererst die grundsätzliche Möglichkeit, Einstellungen des Fahrerassistenzsystems zu ändern. In verschiedenen Fahrzeugen lässt sich beispielsweise das elektronische Stabilitätsprogramm nicht mehr ein- und ausschalten, es gibt daher kein Bedienelement. Die meisten Fahrerassistenzsysteme bieten jedoch Einstellmöglichkeiten und erfordern somit ein Bedienelement. Verbreitete Realisierungen sind:

- Taster bzw. Schalter
- Bedienhebel
- Menü in einer graphischen Anzeige

Eigene Taster bzw. Schalter werden häufig für Systeme eingesetzt, die lediglich ein- bzw. ausgeschaltet werden (z. B. elektronisches Stabilitätsprogramm) oder nur wenige Varianten aufweisen (z. B. adaptive Stoßdämpfer,



Abbildung 3.2: Beispiel eines ACC-Bedienhebels mit Beschreibung der Funktionen (Eigel 2010)

häufig: Komfort, Sport, Automatik). Eigene Bedienhebel findet man in erster Linie bei Geschwindigkeitsregelanlagen oder ACC-Systemen, da insbesondere letztere eine hohe Anzahl an Beeinflussungsmöglichkeiten aufweisen (Abbildung 3.2). Viele Fahrzeugsysteme werden inzwischen über graphische Menüs bedient. Zum einen lassen sich Einstellmöglichkeiten damit auf einfache Weise gruppieren, zum anderen können bei geeigneter Anzeigemöglichkeit die Einstellungen umfangreicher erläutert werden als es die Beschriftung eines Tasters oder Hebels erlaubt. Dabei kommen sowohl Anzeigen, die mittels eines Steuerkreuzes oder Dreh-Drück-Stellers bedient werden, als auch berührungsempfindliche Bildschirme (*Touchscreen*) zum Einsatz.

Den zweiten wesentlichen Aspekt der Mensch-Maschine-Schnittstelle bildet der Rückkanal des Systems zum Fahrer. Dazu stehen folgende Informations- und Warnkanäle zur Verfügung:

- Optik
- Akustik
- Haptik (z. B. Lenkradvibration)
- Kinästhetik (z. B. Bremsruck)

Die meisten Systeme verfügen heute über eine optische Anzeige ihres Systemzustands, häufig als Anzeigesymbol im Kombinationsinstrument. Dabei wird für einige Systeme der aktive Zustand hervorgehoben (z. B. Geschwindigkeitsregelanlage), für andere der inaktive (z. B. elektronisches Stabilitätsprogramm). Akustische Ausgaben werden beispielsweise zur Fahrerwarnung

(z. B. Übernahmeaufforderung bei Erreichung einer Systemgrenze), zur Vermittlung von Distanzen bei Einparkassistentensystemen und für Fahrhinweise bei Navigationsystemen genutzt. Haptische Warnungen finden sich bei Spurverlassenswarnsystemen. Kinästhetische Fahrerwarnungen kommen häufig bei Kollisionswarnsystemen zum Einsatz.

Für das Inverkehrbringen eines neuen Fahrerassistenzsystems hat der Gesetzgeber Anforderungen in Form von Bestimmungen zur Erteilung einer Betriebserlaubnis formuliert. Auf europäischer Ebene wurden solche technischen Vorschriften (ECE-Regelungen) für wesentliche Fahrzeugkomponenten festgelegt. Für automatische Lenkfunktionen, die für Einparkassistentensysteme genutzt werden, finden sich beispielsweise in der ECE-Regelung für Lenkanlagen folgende Bedingungen ([ECE-R79 2006](#)):

[...] die Steuerung (Anm.: der automatischen Lenkfunktion) muss automatisch ausgeschaltet werden, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit den eingestellten Grenzwert von 10 km/h um mehr als 20 % überschreitet [...]

Ebenso wie der Fahrer können weitere Insassen Anforderungen an ein Assistenzsystem haben. Ähnlich der Anforderungen des Fahrers können diese aus dem Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstelle stammen. Dies betrifft zum Beispiel gemeinsam genutzte Ressourcen. So kann eine Anforderung sein, dass sich ein Navigationsgerät auch von der Beifahrerseite bedienen lässt und wesentliche Bedienelemente nicht exklusiv vom Fahrerplatz aus erreicht werden können.

Wenn ein Fahrerassistenzsystem lediglich innerhalb des Fahrzeugs wirkt, in dem es eingebaut ist und weder die Fahrzeugbewegung noch andere Aspekte des Fahrzeugs (z. B. Beleuchtungseinrichtung) beeinflusst, haben andere Verkehrsteilnehmer möglicherweise keine Anforderungen an das Assistenzsystem.<sup>3</sup> Für einige Fahrerassistenzsysteme ist jedoch eine deutliche Sichtbarkeit nach außen gegeben. Bei automatischen Bremsengriffen oder unterstützten Notbremsmanövern ist es beispielsweise sinnvoll, nachfolgenden Verkehr auf solche Manöver hinzuweisen. Dafür wird bei heutigen Systemen z. B. die Warnblinkanlage aktiviert.

Nicht zuletzt haben die unterschiedlichen Organisationsbereiche eines Fahrzeugherstellers Anforderungen an neue Fahrzeugsysteme. Insgesamt ist der Hersteller bestrebt, alle anfallenden Kosten gering zu halten. Dazu gehören Materialkosten (z. B. Einzelkosten für einen Umfeldsensor), Kosten für die Montage und Justage sowie Kosten für eventuell anfallende Wartungs-

---

<sup>3</sup>Diese Eigenschaft selbst kann hingegen eine Anforderung anderer Verkehrsteilnehmer sein.

arbeiten. Sobald ein neues Fahrerassistenzsystem auf zusätzliche Umfeldsensoren angewiesen ist, stehen meist nur wenige mögliche Einbauorte zur Verfügung. Dabei können konkurrierenden Anforderungen bezüglich der Gestaltung der Karosserie oder des Innenraums einerseits und der Detektionsleistung andererseits entstehen.

Die identifizierten Anforderungen der unterschiedlichen Parteien lassen sich nach ihrer Anforderungsart unterscheiden. Man trennt dabei *funktionale* und *nicht-funktionale* Anforderungen:

**Funktionale Anforderungen** Sie beschreiben welche Funktionalität das System erbringen soll und beschreiben dabei sowohl das Normal- als auch das Fehlverhalten. Beispiel: Eine Geschwindigkeitsregelanlage soll eine vom Fahrer eingestellte Wunschgeschwindigkeit einregeln. Wenn die Geschwindigkeitsregelanlage aufgrund eines internen Fehlers nicht zur Verfügung steht, soll der Fehlerzustand für den Fahrer erkennbar angezeigt werden.

**Nicht-funktionale Anforderungen** Sie beschreiben unter anderem auf welche Weise die durch funktionale Anforderungen beschriebene Funktionalität erbracht werden soll. Hierzu gehören z. B. Anforderungen hinsichtlich des Zeitbedarfs zur Erbringung der Funktionalität. Beispiel: Die Geschwindigkeitsregelanlage soll die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers innerhalb eines spezifizierten Zeitraums einregeln.

Die Grenze zwischen funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen ist unscharf. So werden Anforderungen bezüglich der Genauigkeit eines Systems teilweise der einen bzw. anderen Kategorie zugeordnet. Die Formulierung von Anforderungen sollte möglichst lösungsneutral erfolgen, um den möglichen Lösungsraum nicht einzuschränken. So kann eine Anforderung zunächst folgendermaßen lauten (in Anlehnung an [Schäuffele und Zurawka 2006](#)):

„Der Kraftstoffvorrat soll als verbleibendes Volumen in Litern angezeigt werden.“

Tatsächlich kann die Anforderung sein:

„Die verbleibende Reichweite soll genauer erkennbar sein als sie es durch die relative Anzeige des Kraftstoffvorrats (1/4, 1/2 usw.) ist.“

Im ersten Fall würde eine direkte Anzeige der Reichweite in Kilometern auf Basis eines durchschnittlichen Verbrauchs und der Restmenge an Kraftstoff die Anforderung nicht erfüllen, im zweiten Fall jedoch schon.

### Technische Randbedingungen für Funktionsprototypen

Für eine erste technische Realisierung eines neuartigen Assistenzsystems, d. h. die Bewertung einer Fahrsituation und ggf. Bestimmung eines Sollverhaltens, ergeben sich hauptsächlich Anforderungen aus den Bereichen Umfelderkennung, Aktorik, Mensch-Maschine-Schnittstelle und der Kommunikation zwischen den beteiligten Komponenten.

Wesentliche Anforderungen an die Sensorik zur Umfelderkennung betreffen die Aspekte Sichtbereich (lateral, horizontaler Öffnungswinkel, Reichweite) und Behandlung unterschiedlicher Objektarten. Der erforderliche Sichtbereich beeinflusst maßgeblich die Auswahl der Sensorik. Eingeschränkter Öffnungswinkel des Sichtbereichs können dabei teilweise durch den Einsatz mehrerer Sensoren kompensiert werden. Bezüglich der Objektart muss spezifiziert werden, welche Objektarten (Fahrzeuge, Radfahrer, Fußgänger usw.) detektiert werden sollen und welche davon klassifiziert werden müssen, d. h. der entsprechenden Objektkategorie zugeordnet werden. Für die Verfolgung von Objekten (*Tracking*) ist es beispielsweise sehr hilfreich, einen Fußgänger klassifizieren zu können, da sein dynamisches Bewegungsmodell deutlich von dem eines Fahrradfahrers abweicht. Eine weitere wichtige Randbedingung für das Objekttracking ist die Bewegungsrichtung und der Geschwindigkeitsbereich der relevanten Objekte. Beispielhaft seien hier ACC-Anwendungen für Autobahnen (mittlere bis hohe Geschwindigkeit, Längsverkehr) und ein Kreuzungsassistenzsystem (niedrige bis mittlere Geschwindigkeit, Längs- und Querverkehr sowie deren Übergänge bei Abbiegevorgängen) als Beispiele mit deutlich unterschiedlichen Anforderungen an die Sensorik und nachgelagerte Verarbeitungseinheiten genannt. Nicht zuletzt sind für alle Sensoren das Zeitverhalten (Messfrequenz, Latenz) sowie die Messunsicherheit wichtige Attribute, für die Anforderungen formuliert werden können.

Wenn das Assistenzsystem eine optische Warnung oder Information ausgeben soll, müssen entsprechende Anzeigeeinheiten integriert werden bzw. vorhandene Anzeigemöglichkeiten (z. B. im Kombinationsinstrument) müssen ansteuerbar sein. Anforderungsmerkmale betreffen dabei Größe, Farbigkeit, Helligkeit, Position und die Integrationsmöglichkeit im Fahrzeug. Bei akustischen Ausgaben sind Signaltöne, die mit einfachen Summern wiedergegeben werden können, von komplexen Audioausgaben (z. B. Sprachkommandos) zu unterscheiden.

Soll das Assistenzsystem aktiv die Fahrzeugbewegung beeinflussen, ist die Ansteuerung von Brems- oder Lenkaktoren notwendig. Für die Auswahl eines geeigneten Experimentalfahrzeugs bzw. zusätzlicher Aktoren ist dabei einerseits die erforderliche Stärke der Eingriffe wesentlich. Darüber hinaus ist

das Zeitverhalten der Aktoren, d. h. ihre Dynamik, relevant. Für die Entwicklung von Notbremssystemen ist es beispielsweise wichtig, dass der zeitliche Verzug zwischen Anforderung einer Bremsung und tatsächlicher Bremsung möglichst kurz ist. Für die Entwicklung von ACC-Systemen ist hingegen eine möglichst stufenlose Ansteuerbarkeit des Bremssystems von Bedeutung, um insbesondere bei geringen Geschwindigkeiten eine komfortable Regelung zu ermöglichen. Desweiteren kann die Art der Aktorikschnittstelle wesentlich für die Entwicklung eines Sicherheitskonzepts sein. Für die Ansteuerung einer Lenkanlage sind beispielsweise die Vorgabe eines Lenkradmoments oder eines Lenkradwinkels denkbar, die jeweils von unterlagerten Reglern der Lenkanlage realisiert werden. Die Definition eines sicheren Zustands, der im Fehlerfall eingenommen werden soll, ist dabei unterschiedlich komplex. Im Fall der Lenkradmomentvorgabe scheint es sinnvoll, keine Lenkradmoment ( $M_L = 0$ ) anzufordern, sodass der Fahrer allein ein Lenkradmoment aufbringt. Für eine Lenkradwinkelschnittstelle ist die Anforderungen eines Lenkradwinkels von 0 Grad nicht immer sinnvoll (z. B. Kurvenfahrt).

Die Berechnungen für eine neue Assistenzfunktion werden in den meisten Fällen auf einer separaten Recheneinheit durchgeführt. Dabei werden in erster Linie Anforderungen hinsichtlich folgender Komponenten gestellt: Rechengeschwindigkeit des Prozessors, verfügbarer Speicher, ggf. Grafikleistung und verfügbare Schnittstellen (z. B. CAN, Ethernet). Für die prototypische Integration von neuen Fahrerassistenzsystemen werden meist Serienfahrzeuge modifiziert, d. h. es werden keine besonderen Entwicklungsplattformen von Fahrzeugen verwendet. Dies hat den Vorteil, dass alle erforderlichen Änderungen am Fahrzeug, die für eine Serieneinführung notwendig wären, genau bekannt sind. Es führt aufgrund der fortlaufenden Entwicklung der Serienfahrzeuge jedoch auch immer zu Aufwänden, um bereits bestehende Komponenten an neue Fahrzeugschnittstellen anzupassen. Bezüglich der Vernetzungsarchitektur des Gesamtsystems ergeben sich durch die Verwendung von Serienfahrzeugen ebenfalls Randbedingungen. Da CAN-Busse weiterhin stark verbreitet sind, muss diese Schnittstelle meist an einer Stelle der Kommunikationsarchitektur vorgehalten werden.

### **3.2.2 Modellierung**

Die Entwicklung von Software für den Einsatz in Automobilen ist durch ein hohes Maß an Komplexität gekennzeichnet. Diese entsteht zum Teil durch eine komplexe Vernetzungsarchitektur: Die Fahrzeugfunktionen sind auf eine Vielzahl von Steuergeräten verteilt, die durch verschiedenartige Bussysteme

me (CAN, LIN<sup>4</sup>, MOST<sup>5</sup>, FlexRay) und Schnittstellen (*Gateway-Steuergeräte*) miteinander verbunden sind. Am Beispiel eines ESP-Systems wird dies deutlich: Die Funktionen des ESP-Steuergeräts können bei einem Regeleinriff Einfluss auf die Bremsen einzelner Räder nehmen. Außerdem können sie die Motorleistung beschränken und unterstützend auf die Lenkung wirken.<sup>6</sup> Darüber hinaus verursacht der über Fahrzeughersteller und verschiedene Ebenen von Zulieferern verteilte Entwicklungsprozess zusätzliche Komplexität. Für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung gilt darüber hinaus: Auch wenn ein neues Fahrerassistenzsystem für einen zunächst sehr speziellen Teil der Fahraufgabe, z. B. das Einparken in Längsparklücken, konzipiert ist, findet man schnell eine Vielzahl an Varianten der konkreten Aufgabe (Parklückenseite, -größe und -tiefe). Um diese Komplexität zu beherrschen, werden vielfach Modelle eingesetzt. Dabei sind für Assistenzsysteme zunächst folgende Sichten ([Balzert 2000](#)) auf das System wesentlich:

**Szenarienbasierte Sicht** Im Bereich von Fahrzeugsystemen sind die Datenstrukturen meist statisch und durch Randbedingungen der Domäne definiert, z. B. durch die Anzahl an Objekten, die ein Sensor verarbeiten kann ([Sprinkle u. a. 2009](#)). Wegen der dadurch geringeren Bedeutung von Datenstrukturen wird bei der Modellierung meist eine verhaltensorientierte Vorgehensweise auf Basis von Anwendungsfällen (*Use-Cases*) und Szenarien verfolgt. Bei der Entwicklung eines Kreuzungsassistenzsystems könnten beispielsweise zunächst die Anwendungsfälle *querender Verkehr* und *entgegenkommender Verkehr* unterschieden werden. Jeder Anwendungsfall enthält dabei verschiedene Szenarien, z. B. querender Verkehr von links bzw. von rechts. Durch die Verwendung von Szenarien kann die Aufgabe des Assistenzsystems strukturiert werden. Ein mögliches Beschreibungsmittel sind dabei Use-Case- oder Sequenzdiagramme.

**Funktionale Sicht** In der funktionalen Sicht wird die Gesamtfunktion des Assistenzsystems in Teilfunktionen gegliedert. Die allgemeine Struktur für Fahrerassistenzsysteme besteht dabei aus Dateneingabe, Bewertung, Ausgabe (siehe auch Abbildung 2.1). Im Bereich der Ein- und Ausgabe findet man Basisfunktionen, die in vielen Fahrzeugsysteme enthalten sind. So gehört zur Dateneingabe die Abstraktion von konkreten Eingangsschnittstellen (z. B. einzelner CAN-Nachrichten), Ein-

---

<sup>4</sup>Local Interconnect Network

<sup>5</sup>Media Oriented Systems Transport

<sup>6</sup>Bei Bremsungen auf einer Fahrbahn mit stark unterschiedlichen Reibkoeffizienten links und rechts kann ein Giermoment entstehen, das durch Gegenlenken kompensiert werden kann. Das Gegenlenken kann durch Aufbringen eines entsprechenden Lenkmoments unterstützt werden.

heitenumwandlung oder das Generieren zusätzlicher Signale (z. B. vorzeichenbehaftete Größe aus den Einzeldaten Absolutwert und Vorzeichen). Ebenso finden sich häufig Überwachungsfunktionen im Bereich der Dateneingabe, um Rückschlüsse auf den Zustand anderer Komponenten ziehen zu können. Auf der Datenausgabeseite finden sich entsprechend Funktionen, um Daten z. B. wieder als CAN-Nachrichten zu versenden. Außerdem werden häufig Diagnoseschnittstellen geschaffen, um innere Systemzustände zu Entwicklungszwecken beobachten zu können. Als Beschreibungsmittel der funktionalen Sicht werden unter anderem Funktionsbäume eingesetzt. Dies sind hierarchische Diagramme, welche die einzelnen Funktionen des Systems in Subfunktionen gliedern.

**Zustandsorientierte Sicht** Die meisten Fahrzeugsysteme haben eine Vielzahl interner Zustände. Dazu gehören die Initialisierung, verschiedene Zustände des aktiven Betriebs und nicht zuletzt Fehlerzustände. Die Wechsel zwischen Zuständen (*Transitionen*) hängen häufig nicht von einzelnen Eingaben sondern Kombinationen aus Eingaben und Randbedingungen ab (z. B. Aktivierung durch Knopfdruck, jedoch nur oberhalb einer Mindestgeschwindigkeit). Außerdem können identische Bedienhandlungen des Fahrers je nach internem Zustand unterschiedliche Auswirkungen haben. Für die Modellierung des Systemverhaltens werden häufig Zustandsautomaten verwendet.

Nach [Horstmann \(2005\)](#) lassen sich die zur Modellierung eingesetzten Werkzeuge in zwei Kategorien einteilen. Einerseits entstammen sie der objektorientierten Softwareentwicklung mit UML (*Unified Modeling Language*) ([OMG UML 2009](#); [Rumpe 2004](#)). Andererseits werden Werkzeuge der Steuerungs- und Regelungstechnik eingesetzt, in denen Blockschaltprogramme und Zustandsautomaten als Beschreibungsmittel dienen.

### 3.3 Entwurf

Bei der Erstellung von Softwaresystemen werden häufig getrennten Entwürfe für die logische und physikalische Architektur vorgenommen (siehe auch [Kruchten 1995](#)). Im logischen Architekturentwurf werden die funktionalen Subsysteme und ihre Schnittstellen festgelegt. In der physikalischen Architektur werden die Subsysteme auf Hardwaresysteme verteilt und die physikalische Vernetzung und Kommunikation werden definiert. Im Bereich von eingebetteten Systemen im Fahrzeug ist eine solch klare Trennung nicht möglich. Auf-



grund der Interaktion mit physikalischen Prozessen (z. B. Regelung eines Verbrennungsprozesses oder einer Bremsanlage) und im Fall von Fahrerassistenzsystemen der Berücksichtigung von Umfeldsensorik kommt es zu einer Vermischung von logischer und physikalischer Architektur (Broy u. a. 2007). Mit den Anforderungen an die Umfeldsensorik lassen sich in der Entwurfsphase geeignete Sensoren auswählen (siehe auch Abschnitt 2.2). Bei der Verwendung mehrerer Sensoren kann das Zusammenführen von Sensordaten (*Sensordatenfusion*) notwendig sein. Diese wird einerseits bei disjunkten Detektionsbereichen von möglicherweise verschiedenartigen Sensoren zur Bereitstellung einer einheitlichen Schnittstelle verwendet. Andererseits kann eine Sensordatenfusion bei mehreren Sensoren auch zur besseren Beurteilung der Existenzwahrscheinlichkeit eines Objekts herangezogen werden, wenn aufgrund der Sensorinformationen weitreichende Eingriffe, z. B. Notbremsmanöver, durchgeführt werden. Je nach Eingriffsart in die Fahrzeugdynamik muss in der Entwurfsphase ein Experimentalfahrzeug mit geeigneter Aktorik ausgewählt werden bzw. die Modifizierbarkeit vorhandener Aktorik untersucht werden. Im Fall von Bremsenriffen sind aktive Bremskraftverstärker sowie das ESP-System als Aktoren verbreitet. Aktive Bremskraftverstärker sind Unterdruckbremskraftverstärker, die um eine elektronische Ansteuerung mittels Magnetventil erweitert sind. Sie werden für ACC-Systeme und Bremsassistentenfunktionen verwendet (Braess und Seiffert 2007). Ist ein ESP-System in einem Fahrzeug vorhanden, so kann die ESP-Pumpe zum Aufbau eines Bremsdrucks verwendet werden. Abgesehen von der Infrastruktur zur Ansteuerung der ESP-Pumpe sind keine zusätzlichen Bauteile erforderlich. Für optische Ausgaben des Assistenzsystems müssen geeignete Anzeigegeräte und Einbauorte gefunden werden. In Serienfahrzeugen findet man dazu meist eine Anzeige im Kombinationsinstrument sowie das Display des Radio-Navigationsgeräts.

Viele Herausforderungen bei der Strukturierung und dem Entwurf von Softwaresystemen wiederholen sich. Gute Lösungen für Klassen ähnlicher Probleme sind in *Mustern (patterns)* dokumentiert. Nach Gamma u. a. (1994) gehören zu einem Muster:

**Name** Der Name soll das Problem und seine Lösung beschreiben und die Kommunikation zwischen Entwicklern erleichtern.

**Problem** Die Problembeschreibung erläutert den Sachverhalt und den Kontext, in dem das Muster angewendet werden kann.

**Lösung** Die Lösung beschreibt wie das gegebene Problem behandelt werden kann. Es stellt keinen detaillierten Implementierungsvorschlag dar sondern eine abstrakte Lösung, z. B. in Form eines Klassendiagramms.

**Erläuterungen** Hier werden Vor- und Nachteile, Abhängigkeiten und Einschränkungen des Musters erläutert, die dem Entwickler helfen sollen, zu entscheiden, ob das Muster für die gegebene Aufgabe effizient eingesetzt werden kann.

Beispielhaft sollen zwei Architekturmuster erläutert werden, die auch bei der Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen von Bedeutung sind (Gamma u. a. 1994; Buschmann u. a. 1996). Das Muster *Schichten* (*Layers*) beschreibt eine Zerlegung des Gesamtsystems in einzelne Schichten mit definierten Schnittstellen. Die Kapselung der Schichten sorgt für getrennte Entwicklungsmöglichkeiten und einfache Austauschbarkeit der Schichten. Die bereits in Abbildung 2.1 gezeigte Struktur stellt ein solches Schichtenmodell dar.

Das *Pipes & Filter*-Muster<sup>7</sup> (Gamma u. a. 1994) kann angewendet werden, wenn Datenströme mehrere konsekutive Verarbeitungsschritte erfahren. Als Filter wird dabei ein Verarbeitungsmodul bezeichnet, eine Pipe stellt die Verbindung zwischen zwei Verarbeitungsmodulen dar. Abbildung 3.3 zeigt mögliche Filter und deren Verbindungen für ein Fahrerassistenzsystem, das den Fahrer durch die Auswertung von Umfelddaten bei einer Gefahrenbremsung unterstützen kann. Die Erfassung von Objekten und deren Tracking stellen einzelne Verarbeitungsschritte dar. Es schließt sich die Auswahl eines möglichen Kollisionspartners an. Abschließend muss in Abhängigkeit von der Objektkonstellation und der Fahrerbremsung eine Bremsregelung realisiert werden. Die Verarbeitungsschritte lassen sich anhand entkoppelter und definierte Schnittstellen abgrenzen.

Neben den Subsystemen muss in der Entwurfsphase die Kommunikation zwischen den Subsystemen definiert werden. Wichtige Parameter bei der Kommunikation sind die erforderliche Übertragungsgeschwindigkeit, Determinismus, Fehlertoleranz und die Schnittstellenunterstützung bei der eingesetzten Rechenhardware. Neben den gängigen Fahrzeugbussystemen wie CAN, LIN oder FlexRay werden im Vorentwicklungs- und Forschungsbereich auch TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) über Ethernet eingesetzt. Wesentliche Vorteile der Ethernetkommunikation sind die deutlich höhere Übertragungsgeschwindigkeit (CAN: max. 1 MBit/s, Ethernet: 1 GBit) und die Verfügbarkeit von so genannter *Middleware* zur Kommunikation. Dabei stellt eine Middleware eine Softwareschicht dar, welche den Datenaustausch zwischen verschiedenen Applikationen vereinfacht. Der *Data Distribution Service* (DDS) (OMG DDS 2007) ist ein Beispiel und realisiert das Entwurfsmuster *Publisher-Subscriber* (Buschmann u. a. 1996). Die Kommunikation wird zwischen Anbietern von Daten (Publisher) und Abonnenten von

---

<sup>7</sup>auch Kette

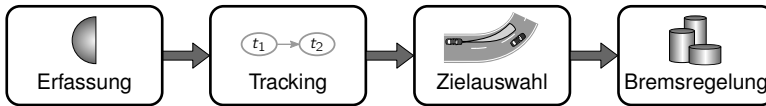


Abbildung 3.3: Beispiel für eine Pipes & Filters-Architektur eines umfeldbasierten Assistenzsystems zur Bremsunterstützung

Daten (Subscriber) hergestellt. Die Daten werden anhand eindeutiger Namen (*Topics*) unterschieden. Es existieren verschiedene Implementierungen des DDS-Standards, die teilweise mehrere Programmiersprachen und Betriebssysteme unterstützen. Dies vereinfacht die Kommunikation deutlich, wenn beispielsweise die Sensordatenverarbeitung sowie Funktionsentwicklung in C++ implementiert werden soll, eine Komponente der Mensch-Maschine-Schnittstelle jedoch eine Java-Schnittstelle zur Verfügung stellt.

Bei der Auswahl der Rechenhardware können unter anderem Mikrocontroller, gewöhnliche Personal Computer (PC) oder Rapid-Prototyping-Systeme (z. B. [dSPACE 2009](#)) eingesetzt werden. Da die verschiedenen Plattformen unterschiedliche Schnittstellen aufweisen und die Implementierung meist nicht in beliebigen Sprachen erfolgen kann, müssen bei der Auswahl sowohl das Kommunikationskonzept als auch die Erfahrungen beteiligter Entwickler berücksichtigt werden. Insbesondere für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung gilt, dass der Aufwand für Tests im Experimentalfahrzeug hoch ist. Ursächlich dafür ist die Schwierigkeit, wiederholt vergleichbare Umgebungsbedingungen, z. B. Objektkonstellationen, herzustellen. Es ist daher üblich, Messdaten der Umfoldsensoren aufzuzeichnen, um sie in einer Simulation erneut abzuspielen. Ebenfalls kann es sinnvoll sein, während einer Realfahrt künstliche Umfeldobjekte ins System einbringen zu können, um einerseits reale Fahrzeugreaktionen beurteilen zu können, andererseits ein effizientes Testen zu ermöglichen. Die dazu notwendige Abstraktion der Umfoldsensoren und weiterer Fahrzeugkomponenten muss beim Entwurf berücksichtigt werden.

Auch wenn durch verschiedene Methoden der Qualitätssicherung (siehe Abschnitt 3.5) Fehler in der Software vermieden werden sollen, muss im Entwurf ein Sicherheitskonzept erarbeitet werden. Dies muss gewährleisten, dass bei Versuchsfahrten im Realfahrzeug mit Aktorikansteuerung im Fehlerfall ein sicherer Zustand hergestellt wird. Die Bestimmung eines sicheren Zustands ist dabei eine wesentliche Aufgabe und führt je nach Systemausprägung zu unterschiedlichen Lösungen: Im Fall eines Systems zur automatischen Fahrt im Stau kann der sichere Zustand das Anhalten des Fahrzeugs im aktuel-

len Fahrstreifen sein. Dieses Manöver ist bei Fahrten mit höheren Geschwindigkeiten auf Autobahnen hingegen ungeeignet. Sind die Systemen jedoch nicht zur automatischen Fahrt sondern als Assistenzsystem konzipiert, lassen sich sichere Zustände leichter finden. Bei Eingriffen in die Längsdynamik kann dies das Deaktivieren von Beschleunigungs- bzw. Bremsanforderungen sein. Nach der Definition eines sicheren Zustands muss der kritische Pfad, der zu Aktorikansteuerungen führen kann, identifiziert werden. Da die Ansteuerung vieler Fahrzeugaktoren per CAN-Schnittstelle realisiert wird, kann an der Schnittstelle zum dem entsprechenden CAN-Bus ein *Watchdog* (Hanmer 2007) vorgesehen werden. Der Watchdog dient zur Fehlererkennung und überprüft alle Ansteuerbotschaften. Dabei kann die Botschaftsüberwachung folgende Aspekte betreffen:

**Timeout** Bei periodisch erwarteten Ansteuerbotschaften oder Botschaften, die zusätzlich zur Überwachung verwendet werden (z. B. Geschwindigkeitsinformation), kann die Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Botschaften ausgewertet werden.<sup>8</sup>

**Botschaftszähler** Wenn die Ansteuerbotschaft mit einem Botschaftszähler versehen ist, kann dieser auf korrektes Inkrementieren überprüft werden. Sprünge des Botschaftszählers deuten auf ein fehlerhaftes Verhalten des Senders oder verlorene Botschaften infolge von Übertragungsfehlern hin.

**Prüfsumme** Wenn die Ansteuerbotschaft mit einer Prüfsumme versehen ist, kann diese auf Korrektheit überprüft werden, um Übertragungsfehler zu erkennen.

**Nominalwert** Bei Aktorikanforderungen (z. B. Lenkmoment) kann der Wert der Anforderung überwacht werden.

Darüber hinaus kann ein solcher Watchdog genutzt werden, um die Bordspannung im Fahrzeug zu beobachten oder Schalterstellungen einzulesen, mit denen z. B. der Aktorikeingriff explizit freigegeben werden muss. Weiterhin kann über einen Watchdog ein Not-Aus-Konzept realisiert werden. Dazu kann ein Not-Aus-Schalter die Spannungsversorgung des Watchdogs trennen und damit die Verbindung zur Aktorikansteuerung unterbrechen.

---

<sup>8</sup>Dies wird auch als Heartbeat bezeichnet.

## 3.4 Implementierung

Ausgehend von der Softwarearchitektur und der Spezifikation der Subsysteme wird das Fahrerassistenzsystem implementiert. Die dafür eingesetzte Programmiersprache ergibt sich häufig aus der Architektur des Gesamtsystems, insbesondere aus starken Verknüpfungen zu Randbedingungen wie der eingesetzten Recheneinheit oder einem etablierten Entwicklungsrahmenwerk. Bei der Implementierung sollten Codierungsrichtlinien verwendet werden, wodurch die Entwicklung mit mehreren Entwicklern stark vereinfacht und Fehlern vorgebeugt wird. Man findet Codierungsrichtlinien für alle wesentlichen Programmiersprachen, teilweise speziell auf den automobilen Kontext zugeschnitten (z. B. [MAAB 2001](#); [MISRA-C 2004](#); [MISRA-C++ 2008](#)). Codierungsrichtlinien können Regeln zu folgenden Aspekte enthalten:

- Wahl von Bezeichnern (Namen für Klassen, Objekte, Attribute, Operationen)
- Art und Umfang der Dokumentation im Quelltext
- verwendete Sprache (Deutsch oder Englisch) für Quelltext und Kommentare
- Formatierungsrichtlinien (Klammerung, Einrückung, Subsystemverbindungen)
- empfohlene bzw. zu vermeidende Konstrukte (z. B. Verwendung von symbolischen Konstanten statt „Magic Numbers“)

Eine automatisierte Überprüfung von Codierungsrichtlinien findet sich beispielsweise bei [Basarke u. a. \(2007\)](#).

In Software von Seriensteuergeräten wird üblicherweise zwischen Datenstand und Programmstand unterschieden ([Schäuffele und Zurawka 2006](#)). Auch wenn diese Unterscheidung im Forschungsbereich wegen meist noch serienferner Hardware von geringer Bedeutung ist, sollte festgelegt werden, welche Werte des Assistenzsystems zur Laufzeit dynamisch angepasst werden müssen. Dazu gehören neben Reglerparametern auch den Ablauf beeinflussende Schalter, die beispielsweise zwischen einem realen Umfeldsensor und simulierten Objekten umschalten. Auch bei Werten, die nicht zur Laufzeit angepasst werden sollen, kann die Beobachtbarkeit bei der Entwicklung sehr hilfreich sein. So kann eine Visualisierung der detektierten Umfeldobjekte dabei helfen, Fehler in der Situationsbewertung von Fehldetektionen der Sensorik zu unterscheiden. Je nach eingesetzten Entwicklungswerkzeugen ist der Aufwand für Anpassbarkeit und Introspektion unterschiedlich.

## 3.5 Test

Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Softwareentwicklung werden in *konstruktive* und *analytische* Maßnahmen untergliedert (Horstmann 2005). Zu den konstruktiven Maßnahmen gehören sowohl technische Aspekte, z. B. die Verwendung geeigneter Entwicklungswerkzeuge, als auch organisatorische, z. B. die Anwendung von prozessbeschreibenden Phasenmodellen (z. B. Sommerville 2004). Ein zentrales analytisches Qualitätssicherungsinstrument ist das Testen der Software (Beck 2002). Dadurch soll eine maximale Korrektheit der Software, d. h. Übereinstimmung mit der Anforderungsspezifikation, erreicht werden. Nach Horstmann (2005) gehören folgende Aktivitäten zum Testprozess:

**Definition Testspezifikation** In der Definition der Testspezifikation werden Testkriterien festgelegt, d. h. welche Testabdeckung angestrebt wird (Abdecken von Zuständen, Transitionen oder Anweisungen). Darüber hinaus wird das Testorakel<sup>9</sup> ausgewählt.

**Testfallermittlung** Je nach Formalisierungsgrad der Spezifikation und der Modelle werden Testfälle automatisch oder manuell erzeugt.

**Testinstrumentierung** Zur Testinstrumentierung gehört neben der Installation und Konfiguration der Testumgebung die Datenkonkretisierung, d. h. die Wahl von exemplarischen Werten, die das Verhalten aller relevanten Eingaben abbilden (*Äquivalenzklasse*).

**Testausführung** Neben dem eigentlichen Aufruf der Tests gehört auch das Sichern der Systemantworten für die anschließende Auswertung zur Testausführung.

**Testauswertung** Die Testauswertung stellt den meist toleranzbehafteten Vergleich der Systemantworten mit denen des Testorakels dar und entscheidet, ob ein Test bestanden wurde.

**Testdokumentation** Die Testdokumentation fixiert die Ergebnisse der Testauswertung z. B. in Form eines Berichts.

Das Testen des Fahrerassistenzsystems soll hier auf zwei unterschiedlichen Ebenen betrachtet werden: Gesamtsystemtest, Komponententest. Einerseits kann das Gesamtsystem im Experimentalfahrzeug auf speziellen Prüfgeländen und im öffentlichen Straßenverkehr getestet werden. Andererseits kann das System in Simulationen untersucht werden. Dabei können aufgezeich-

---

<sup>9</sup>Ein Testorakel liefert die erwarteten Systemausgaben für einen Testfall (Binder 1999).

	Labor	Prüfgelände	Realverkehr
Aufgezeichnete Daten	✓		
Generierte Daten	✓	✓	
Realdaten		✓	✓

Tabelle 3.1: Verwendung von verschiedenen Datenquellen in unterschiedlichen Testumgebungen für Tests des gesamten Fahrerassistenzsystems

nete und generierte Messdaten sowie aktuelle Messdaten der Sensorik als Datenquelle dienen (siehe Tabelle 3.1). Die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen stellt dabei besondere Anforderungen an verwendete Simulationen, da nicht mehr nur das eigene Fahrzeug, sondern auch Teile der Umwelt simuliert werden müssen (Breuer 2004). Um auch kleine Evolutionen des Gesamtsystems effizient testen zu können, müssen einzelne Komponenten der Software (*units*) testbar sein. Im Fall von objektorientierter textueller Programmierung sind dies z. B. Methoden einer Klasse. Das auf Beck (1989) zurückgehende Konzept der *Unit-Tests* hat das Ziel, Softwareprobleme in einer frühen Entwicklungsphase zu finden, in welcher der Aufwand zur Behebung noch gering sind. Für einen effektiven Entwicklungsprozess bedarf es Mechanismen, die das Testen reproduzierbar und automatisierbar machen. Bezüglich der Automatisierung stehen vor allem die wiederholt auszuführenden Aktivitäten Testausführung, -auswertung und -dokumentation im Vordergrund. Für textuelle Programmiersprachen gibt es dazu eine Vielzahl von Modultest-Software (*xUnit-Test-Framework*), die eine Erstellung und die komfortable Ausführung von Testfällen ermöglicht (Hamill 2004). Bei der Testdokumentation ist eine strukturierte Ergebnisdarstellung der durchgeführten Tests wesentlich, um in kurzer Zeit einen Überblick zu erhalten, ob eine Weiterentwicklung der Software unerwünschte Nebenwirkungen hatte und ein Softwaretest nicht mehr bestanden wird (*Regressionstest*).

Abhängig vom erforderlichen Wissen über den Aufbau der Software können folgende Testarten unterschieden werden:

**Black-Box-Tests** (*Funktionale Tests*) Unter Kenntnis der Schnittstellen der Software werden verschiedene Eingaben getätigt und die Ausgaben mit erwarteten Werten verglichen. Dabei wird lediglich das Verhalten des Systems, nicht jedoch die konkrete Implementierung, betrachtet.

**White-Box-Tests** (*Strukturtests*) Die Gestaltung der Tests erfordert Kenntnis über die Struktur der Software. Ziel dabei ist das möglichst vollständige

Testen des Codes. Dafür werden verschiedene Metriken, wie die Anweisungsüberdeckung oder Pfadüberdeckung angewendet.<sup>10</sup>

Zusätzlich wird der Begriff der *Grey-Box-Tests* verwendet, der Aspekte des Black- und White-Box-Testens vereint.

Ab einem gewissen Reifegrad des Fahrerassistenzsystems wird häufig eine Probandenstudie durchgeführt. Das Ergebnis einer Probandenstudie kann eine Bewertung grundsätzlicher Aspekte, wie die Akzeptanz der Funktionalität, oder auch spezifischer Fragestellungen, z. B. zur Reglerauslegung für eine Lenkempfehlung, sein. Je nach Systemausprägung (z. B. Gefährlichkeit von Fahrversuchen, Variationen des Versuchsaufbaus) können dabei verschiedene Techniken angewendet werden:

**Fahrsimulator** In Fahrsimulatoren werden das eigene Fahrzeug und die Umgebung in einer Simulation abgebildet. Der Fahrer sitzt vor einer realen Instrumententafel oder entsprechenden Nachbildung und sieht eine Projektion – meist auf mehreren Projektionsflächen – der Fahrumgebung vor sich. Rückspiegel können durch Anzeigen ersetzt sein oder die Bilder von Anzeigen bzw. weiteren Projektionsflächen widerspiegeln. Für eine bessere Abbildung von Beschleunigungen findet man auch bewegte Fahrsimulatoren, in denen z. B. eine ganze Fahrzeugkabine mit den Projektionsflächen auf einer hydraulischen Plattform montiert ist. In Fahrsimulatoren lassen sich – abhängig von der Software zur Umgebungssimulation – eine große Vielzahl an Verkehrssituationen erzeugen. Dabei sind schnelle Wechsel der Szene sowie das Herstellen von im Realverkehr gefährlichen Situationen möglich. Simulationstechniken für einzelne Komponenten eines Fahrzeugsystems, das auf Umfeldwahrnehmung basiert, werden werden z. B. von [Berger \(2010\)](#) behandelt.

**Teilsimulation** Durch Teilsimulationen kann der Einsatz von virtuellen Techniken mit realem Fahrgefühl verbunden werden. Bei [Bock u. a. \(2008\)](#) wird eine Videobrille vorgestellt, mit der dem Fahrer eines Experimentalfahrzeugs eine Umgebungssimulation vergleichbar zu einem Fahrsimulator dargestellt werden kann. Da der Fahrer die Umgebung durch die Videobrille während der Fahrt nicht sieht, können solche Fahrversuche nur in einem Prüfgelände durchgeführt werden. Alternativ können die Anzeigen der Videobrille halbtransparent geschaltet werden, sodass dem Fahrer neben der realen Umgebung (z. B. Straßenverlauf) virtuelle

---

<sup>10</sup>Anweisungsüberdeckung ist erreicht, wenn jede Anweisung des Codes bei mindestens einem Testfall überprüft wird. Pfadüberdeckung ist erreicht, wenn jeder durch Steuerstrukturen (z. B. Bedingungen) mögliche Pfad des Programms in einem Testfall ausgeführt wird.





Abbildung 3.4: Beispiel einer Objektimitation in Form eines klappbaren Auslegers mit Tripelspiegel

Objekte eingeblendet werden können. Da die Visualisierung in der Videobrille den Sichtbereich des Fahrers darstellen soll, benötigt dieses System einen so genannten Headtracker zur Erfassung der Kopfposition.

**Objektimitation** Für Fahrversuche, in denen eine Kollision mit anderen Fahrzeugen nicht ausgeschlossen werden kann, werden auch Objektimitationen eingesetzt. Bei Hoffmann und Winner (2009) wird ein Gespann aus Zugfahrzeug und einem Anhänger, an dem ein reales Fahrzeugheck montiert ist, vorgestellt. Dabei ist der Anhänger durch eine Seilwinde mit dem Zugfahrzeug verbunden. Wenn die Seilwinde entkoppelt und zusätzlich der Anhänger gebremst wird, kann das Bremsmanöver eines Fahrzeugs nachgebildet werden. Die Seilwinde wird automatisch wieder eingekoppelt, wenn ein herannahendes Versuchsfahrzeug, in dem z. B. ein Bremsassistentensystem erprobt wird, mit dem Anhänger zu kollidieren droht. Dazu ist im Anhänger ein Umfeldsensor eingebaut, der das Versuchsfahrzeug erfasst. Durch das Einkoppeln der Seilwinde wird der Anhänger wieder auf die Geschwindigkeit des Zugfahrzeugs beschleunigt. Zur Erprobung von auf Radar- oder Lidarsensoren basierenden Systemen kommen auch klappbare Ausleger zum Einsatz, an deren Ende ein geeigneter Reflektor angebracht ist. Solche Ausleger können z. B. an der Anhängerkupplung eines Fahrzeugs befestigt werden und stellen ein Objekt im Nachbarfahrstreifen des Trägerfahrzeugs dar. Abbildung 3.4 zeigt ein Beispiel mit einem Tripelspiegel, der gut für Radarsensoren geeignet ist.

**Reale Objekte** Für Fahrversuche, bei denen keine Fahrsituationen mit Kollisionsgefahr hergestellt werden müssen, können reale Fahrzeuge ver-

wendet werden. Je nach Art der Fahrmanöver besteht bei der Beteiligung menschlicher Fahrer das Problem der Reproduzierbarkeit.

Die Anpassung des Systems anhand der Ergebnisse aus Probandenversuchen stellt meist einen der letzten Schritte bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen in der industriellen Forschung dar. Wenn das System abschließend als geeignet für die Großserienentwicklung beurteilt wird, findet ein Projekttransfer an eine andere Organisationseinheit statt. Zum Übergabebereich gehört neben den erzeugten Artefakten (z. B. Modellen oder Quellcode) eine Projektdokumentation, welche die Erkenntnisse des Forschungsprojekts zusammenfasst. Dabei sollten auch nicht erfolgreiche Zwischenschritte erwähnt werden (z. B. Umfeldsensor mit zu schlechter Detektionsleistung, unverständliches Bedienkonzept für Fahrer), um so Gestaltungsempfehlungen für die serienmäßige Ausprägung des Assistenzsystems geben zu können.

# Kapitel 4

## Situationsanalyse

No single model exists for all pattern recognition problems and no single technique is applicable to all problems. Rather what we have in pattern recognition is a bag of tools and a bag of problems.

---

(Kanal, 1972)

In diesem Kapitel werden die Grundlagen einer Situationsanalyse erarbeitet und es wird ein probabilistisches Modell zur Erkennung von Fahrsituationen vorgeschlagen. Nach begrifflichen Abgrenzungen in Abschnitt 4.1 werden zunächst einige Methoden zum Schlussfolgern auf ihre Eignung zur Situationsanalyse untersucht (Abschnitt 4.2).

In Abschnitt 4.3 wird näher auf Bayes'sche Netze und ihr theoretisches Rahmenwerk eingegangen. Abschnitt 4.4 behandelt die Besonderheiten temporaler Effekte, die mit Bayes'schen Netzen ebenfalls abgedeckt werden können.

Abschließend wird eine allgemeine Modellstruktur zur Fahrerintentionserkennung vorgeschlagen und für die Erkennung von Fahrstreifenwechselmanövern verwendet (Abschnitt 4.5).

### 4.1 Einführung

Da dem Fahrer auch bei Verwendung eines Fahrerassistenzsystems weiterhin die Fahrzeugführung obliegt, fehlt Fahrerassistenzsystemen weitgehend das Wissen über die zukünftige Trajektorie des Fahrzeugs. Für eine Analyse der vom Fahrer gewählten Trajektorie sind folgende Begriffe wesentlich (Pellkofer 2003):

**Szene** Eine Szene beschreibt die zeitlich-räumliche Anordnung von Objekten

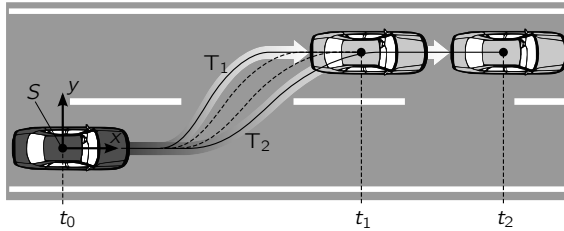


Abbildung 4.1: Trajektorienbündel eines Fahrstreifenwechsels

ohne deren Handlungsmöglichkeiten in Betracht zu ziehen.

**Situation** Eine Situation wird durch die Menge der Sachverhalte gebildet, die für die Verhaltensentscheidung relevant sind. Sie erweitert die Szene um einen Handlungsaspekt.

**Intention** Die Intention steht für die Handlungsabsicht eines Objekts.

Unterschiedliche Intentionen von Fahrern (auch Fahrerabsicht) treten bezogen auf die drei Handlungsebenen der Fahrzeugführung vor allem auf den Ebenen der *Navigation* und der *Bahnführung* auf. Bezüglich der Stabilisierungsebene hat der Fahrer üblicherweise die Absicht, das Fahrzeug in einem stabilen Zustand zu halten. Zu einem stabilen Zustand gehört es, unkontrollierte Gierbewegungen oder verminderte Lenkfähigkeit infolge blockierter oder schleudernder Räder zu vermeiden. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Fahrerassistenzsystemen, die auf der Bahnführungsebene wirken. Demzufolge wird die Fahrerabsicht wie auch bei Kopf (2005) bezogen auf das nächste geplante Manöver verstanden. Dabei ist die exakte Trajektorie  $\mathbf{T} = (x, y, \phi)$  weniger von Interesse als das Manöver (z. B. Fahrstreifenwechsel), das eine Menge von Trajektorien (Trajektorienbündel) beschreibt (siehe Abbildung 4.1).

## 4.2 Methoden zum Schlussfolgern

Da die Fahrerabsicht nicht direkt gemessen werden kann, ist es erforderlich, durch möglichst umfassende Betrachtung der Situationsmerkmale Rückschlüsse darauf zu ziehen. Es existieren verschiedene Ansätze zur Kombination heterogener Informationen, von denen einige im Folgenden erwähnt und auf ihre Eignung im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Dabei sind

folgende Randbedingungen wesentlich: Einerseits soll es möglich sein, explizites Wissen z. B. über Verkehrsregeln in das System einbringen zu können. Andererseits sollte es aufgrund der Behandlung individueller Fahrerhandlungen möglich sein, Systemparameter automatisiert aus Messdaten ableiten zu können. Darüber hinaus sollten die Algorithmen des Gesamtsystems für den Entwickler transparent sein, sodass das erzeugte Verhalten erklärt werden kann.

### 4.2.1 Logik

Logik ist eine der wesentlichen Methoden bei der Beschreibung von Wissen. In diesem Abschnitt werden einige Logiken präsentiert und es wird auf ihre Unterschiede eingegangen (Russell und Norvig 2004; Beierle und Kern-Isberner 2008).

#### Aussagenlogik

Die Aussagenlogik (auch *Boolesche<sup>1</sup> Logik*) umfasst einfaches Schließen aus Wahr/Falsch-Aussagen, den so genannten *Elementarsätze* (auch *atomare Aussagen*). Elementarsätze sind stets von der Form *Nominator – Kopula – Prädikator*. Ein Beispiel für diese Syntax ist:

$$\underbrace{\text{Adaptive Cruise Control}}_{\text{Nominator}} \underbrace{\text{ist}}_{\text{Kopula}} \underbrace{\text{ein Fahrerassistenzsystem}}_{\text{Prädikator}}.$$

Jeder Elementarsatz kann entweder gelten oder nicht, d. h. einzig die beiden Zustände *wahr* und *falsch* können auftreten. Zur Bildung komplexer Sätze kennt die Aussagenlogik verschiedene logische Verknüpfungen (*Junktionen*):

- ¬ Nicht: dient der Verneinung (Negation) eines Satzes.
- ∧ Und: Sind zwei Sätze durch ∧ verbunden, so ist der neu gebildete Satz (*Konjunktion*) genau dann *wahr* wenn beide Teilsätze (*Konjunkte*) *wahr* sind.
- ∨ Oder: Sind zwei Sätze durch ∨ verbunden, so ist der neu gebildete Satz (*Disjunktion*) dann *wahr* wenn mindestens einer der Teilsätze (*Disjunkte*) *wahr* ist.
- ⇒ Impliziert: Implikationen bestehen aus einer Prämisse (*P*) und einer Kon-

<sup>1</sup>nach dem Logiker George Boole (1815–1864)

sequenz ( $K$ ):  $P \Rightarrow K$ . Sie werden auch als *Regeln* oder Wenn/Dann-Aussagen bezeichnet.

⇔ Genau dann, wenn: Ein Satz der Form  $A \Leftrightarrow B$  heißt Bikonditional oder Bi-Implikation und ist identisch zu  $A \Rightarrow B \wedge B \Rightarrow A$

Die Schlüsse, die in einem aussagenlogischen System gezogen werden, sind dabei korrekt, solange die Aussagen formal korrekt sind. Die Aussagenlogik ist kompositional, d. h. der Wahrheitswert einer Aussage kann aus den Wahrheitswerten der atomaren Aussagen ermittelt werden. Dieses Prinzip wird als *Wahrheitsfunktionalität* bezeichnet.

### Logik erster Stufe

Die *Logik erster Stufe* (auch *Prädikatenlogik*) erweitert die Aussagenlogik, der die Fähigkeit fehlt, eine Umgebung mit vielen Objekten und Relationen in Form allgemeiner Regeln abstrakt zu beschreiben. Dazu wird in der Logik erster Stufe der Allquantor  $\forall$  und der Existenzquantor  $\exists$  eingeführt. Mit diesen Quantoren ist es möglich, Aussagen über Gegebenheiten *aller* oder *einiger* Objekte zu treffen. Die Logik erster Stufe ist dadurch mächtig genug, um den größten Teil unseres allgemeinen Wissens zu repräsentieren.

### Regelbasierte Methoden

Die Aussagen- und Prädikatenlogik bilden die Grundlage für regelbasierte Systeme. Regeln sind formalisierte Konditionalsätze der Form

wenn *<Prämisse>* dann *<Konklusion>*

Regeln bilden meist einen guten Kompromiss zwischen formalen Ansprüchen an die Wissensrepräsentation und einem intuitiven Zugang. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass widersprüchliche Regelbasen aufgestellt werden können. Man unterscheidet dabei folgende Fälle (Beierle und Kern-Isberner 2008):

- Die Regelbasis ist im klassisch-logischen Sinn inkonsistent, da es keine Ausprägung der Werte der Objekte gibt, für die die gesamte Regelbasis erfüllt ist. Beispiel:

Regel:  $A \wedge \neg A \Rightarrow B$

- Die Regelbasis lässt widersprüchliche Schlussfolgerungen zu. Beispiel:

Regel 1:  $A \Rightarrow B$

Regel 2:  $A \wedge C \Rightarrow \neg B$

Beobachtung:  $A, C$

Um dies zu vermeiden, ist es sinnvoll, syntaktisch einfache Regeln zu verwenden. Eine Möglichkeit der Vereinfachung besteht darin, auf die Verknüpfung  $\vee$  (oder) in der Prämisse zu verzichten. Außerdem sollte die Konklusion einer Regel aus einem einzigen Literal bestehen. Die Beschränkungen auf eine solche Regelstruktur erhöht zwar die Anzahl der Regeln, vereinfacht jedoch die Auswertung und hilft so, Inkonsistenz zu vermeiden. Zur weiteren Strukturierung und Veranschaulichung der Regelbasis werden häufig Entscheidungs-bäume und -tabellen verwendet.

### Endliche Automaten

Durch die Verkettung von Regeln zu Abläufen unter Berücksichtigung des aktuellen Systemzustands können deterministische endliche Automaten erzeugt werden. Ausgehend von einem Initial-Zustand führen Systemeingaben zu Übergängen (*Transitionen*) in andere Zustände des Automaten. Um einen deterministischen Automaten zu erzeugen, muss sichergestellt sein, dass die Bedingungen für Zustandsübergänge aus einem Zustand für alle Zielzustände disjunkt sind. Üblicherweise führt das so modellierte System unterschiedliche Aktionen für die einzelnen Systemzustände aus. Außerdem sind besondere Aktionen beim Eintreten bzw. Verlassen eines Zustands üblich.

### Anwendungen und Grenzen logikbasierter Systeme

Es gibt eine Reihe von Funktionen, die sich durch logisches Schließen realisieren lassen. In [Steiner u. a. \(2005\)](#) wird ein blinkendes Bremslicht vorgestellt, das den rückwärtigen Verkehr bei Gefahrenbremsungen warnen soll. Dabei wird die Auslösung der Blinkansteuerung  $K_B$  durch eine logische Oder-Verknüpfung der Aussagen

- $K_1$ : die Verzögerung ist stärker als  $-7,5 \text{ m/s}^2$ , d. h.  $a_x \leq -7,5 \text{ m/s}^2$
- $K_2$ : die Bremspedalgeschwindigkeit  $\dot{u}_{BP}$  ist höher als ein Schwellwert  $\dot{u}_{BP}^*$  und die Auslöseschwelle eines Bremsassistenten  $ba$  wird überschritten, d. h.  $\dot{u}_{BP} \geq \dot{u}_{BP}^* \wedge ba = \text{wahr}$
- $K_3$ : der Bremsdruck  $p_B$  ist höher als ein Schwellwert  $p_B^*$  und größer als für die zwischen Reifen und Fahrbahn übertragbare Bremskraft notwendig<sup>2</sup>, d. h.  $p_B \geq p_B^* \wedge abs = \text{wahr}$

Das heißt:

$$K_1 \vee K_2 \vee K_3 \Rightarrow K_B$$

---

<sup>2</sup>Dies ist an einem Regeleinriff des ABS zu erkennen.

Betrachtet man erneut die bereits in Abschnitt 2.4 erwähnte Anpassung eines ACC-Systems allein in Abhängigkeit von dem Zustand des linken Fahrtrichtungsanzeigers, dann gilt:

linksBlinken  $\Rightarrow$  accVerstellung

Diese Regel führt auch in folgenden Fällen zu einer Anpassung des Systemverhaltens:

- Es besteht Überholverbot, d. h. ein Fahrstreifenwechsel ist nicht erlaubt.
- Ein Fahrstreifenwechsel würde aufgrund eines schnell herannahenden Fahrzeugs auf dem linken Nachbarfahrstreifen zu einer unkomfortablen Situation führen.
- Ein Fahrstreifenwechsel ist unmöglich, da sich ein Objekt neben dem eigenen Fahrzeug befindet oder kein Fahrstreifen links neben dem eigenen vorhanden ist.
- Linksverkehr

Die genannten Fälle können durch eine tiefergehende Situationsanalyse abgedeckt werden. Auch wenn diese Situationsanalyse mit Hilfe einer Regelbasis darstellbar ist, wird im folgenden Abschnitt gezeigt, dass eine Analyse mit Berücksichtigung von Unsicherheit sinnvoll ist.

### Unsicherheit

Neben den oben genannten Beispielen lassen sich noch weitere angeben, bei denen eine Verstellung eines ACC-Systems trotz eines aktivierten linken Fahrtrichtungsanzeigers nicht angemessen ist. Allerdings gelingt es für reale Verkehrssituationen häufig nicht, ein Modell mit allen relevanten Merkmalen zu ermitteln, welches die Situation *aus Fahrersicht* vollständig beschreibt. Dies bezeichnet man allgemein als *Qualifikationsproblem*. Die Schlüsse, die in einem solchen Modell gezogen werden, sind deshalb grundsätzlich mit Unsicherheit behaftet.

Die Ursachen der Unsicherheit lassen sich folgendermaßen zusammenfassen (Russell und Norvig 2004):

- Komplexität der Modellierung: Um eine einfache Beschreibung des Sachverhalts zu ermöglichen, werden nur einige Eigenschaften des realen Systems modelliert.
- Theoretisches Unwissen: Aufgrund von Unwissen ist kein vollständiges Modell vorhanden. Das Verhalten des Menschen ist ein Beispiel hierfür.



- Praktisches Unwissen: Auch mit einem vollständigem Modell liegt Unsicherheit vor, wenn nicht alle relevanten Größen des Modells ermittelt werden können.<sup>3</sup>

Wegen der fehlenden Möglichkeit Unsicherheit zu behandeln, werden logikbasierte Verfahren in dieser Arbeit nicht verwendet.

### 4.2.2 Dempster-Shafer-Evidenztheorie

Die Evidenztheorie basiert auf den Arbeiten von **Dempster** und **Shafer** und ist darauf ausgelegt, zwischen Unsicherheit und Unwissen zu unterscheiden (**Dempster 1968; Shafer 1976**). Sie berücksichtigt explizit die Zuverlässigkeit einer Quelle, benötigt deshalb aber stets eine Aussage über deren Glaubwürdigkeit.

Die klassische Wahrscheinlichkeitstheorie kennt für eine zweiwertige Aussage  $a_{\text{bool}}$  die Wahrscheinlichkeitswerte

$$\begin{aligned} P(A) &= P(a_{\text{bool}} = \text{wahr}) \quad \text{und} \\ P(\neg A) &= P(a_{\text{bool}} = \text{falsch}) . \end{aligned}$$

Dabei gilt stets

$$P(A) + P(\neg A) = 1 .$$

Die Wahrscheinlichkeiten  $P(A)$  und  $P(\neg A)$  lassen jedoch keine Rückschlüsse über die Glaubwürdigkeit der Aussage zu. Besonders deutlich wird der Unterschied an folgendem Beispiel (siehe **Yi u. a. 2000**): Wenn ein Fahrzeug das Umfeld mit Sensoren erfasst und einen befahrbaren Bereich identifizieren soll, macht es einen fundamentalen Unterschied, ob in einem gewissen Gebiet nur keine Objekte detektiert wurden (z. B. aufgrund des eingeschränkten Erfassungsbereichs der Sensoren) oder ob erkannt wurde, dass keine Objekte vorhanden sind. Im ersten Fall spricht man von Unwissen, im zweiten Fall liegt Unsicherheit vor, da die Messung des Sensors fehlerbehaftet sein kann. Wenn ein Fahrzeug selbst einen geeigneten Fahrweg auswählen soll, wird es Gebiete meiden, für die keine Aussage über die Befahrbarkeit getroffen werden können (siehe Abbildung 4.2).

Dazu verwendet die Evidenztheorie die Begriffe *Grad des Vertrauens*<sup>4</sup> (*degree of belief, bel*) und die *Plausibilität* (*pl*), welche die untere bzw. obere

<sup>3</sup>Liegt beispielsweise ein Modell über das Verhalten des Menschen vor, das seine kognitive Beanspruchung einschließt, so ist diese Größe bei Fahrzeugführern als unbekannt anzunehmen, da sie nicht praktikabel ermittelt werden kann.

<sup>4</sup>auch: *Grad des Dafürhaltens* (*support*)

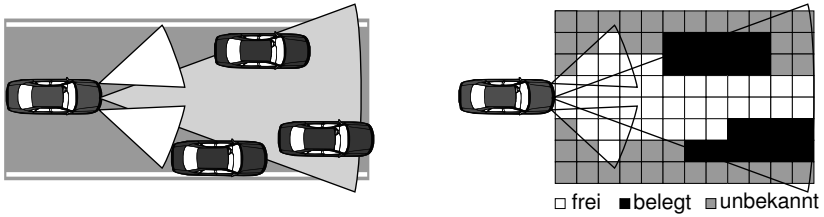


Abbildung 4.2: Unstrukturierte Verkehrsszene mit mehreren detektierten Objekten (links) und ihre mögliche Repräsentation in einer Belegungskarte (rechts)

Grenze des Glaubensbereichs darstellen. Detektiert ein Radarsensor, für den man eine Detektionszuverlässigkeit von 95 % ermittelt hat, beispielsweise ein Objekt vor dem eigenen Fahrzeug (Hypothese  $H_O$ ), dann gilt für  $H_O$ :

$$bel(H_O) = 0,95 .$$

Die verbleibenden 5 % werden nun nicht dem Komplement  $\neg H_O$  sondern der Menge aller Hypothesen zugeschrieben. Wenn es z.B. von anderen Sensoren keine Hinweise darauf gibt, dass sich vor dem Fahrzeug kein Objekt befindet, gilt für die Gegenhypothese  $\neg H_O$

$$bel(\neg H_O) = 0 .$$

Für die Plausibilität von  $H_O$  gilt damit:

$$pl(H_O) = 1 - bel(\neg H_O) = 1 .$$

Das Intervall  $[0,95, 1]$  kann nun als Wahrscheinlichkeitsintervall für das Eintreten von  $H_O$  interpretiert werden und für Reaktionen auf ein mögliches Objekt vor dem Fahrzeug herangezogen werden.

Bei der Kombination verschiedener Informationsquellen bewerten alle Quellen die vorliegenden Hypothesen in Form von Gewichten (*masses*). Diese entsprechen keinen Wahrscheinlichkeiten, sodass der Zugang zur Evidenztheorie weniger intuitiv ist (Koks und Challa 2005).

Im Rahmen dieser Arbeit ist die Sensorik derart gestaltet, dass kein Unwissen auftritt. Die Menge der Eingangsgrößen ist bekannt und alle verwendeten Informationen werden vollständig sowie mit hinreichender Glaubwürdigkeit geliefert. Bei der Erkennung von einzelnen Manövern spielt es darüber

hinaus eine untergeordnete Rolle, ob über ein Manöver wenige Informationen (Unwissen) vorliegen oder man aufgrund widersprüchlicher Informationen unentschieden ist (Unsicherheit). In beiden Fällen würde im Rahmen dieser Arbeit von einer Anpassung eines Fahrerassistenzsystems abgesehen werden. Für die Fusion von Sensordaten ist die Differenzierung von Unsicherheit und Unwissen von größerer Bedeutung. Daher wird die Dempster-Shafer-Evidenztheorie häufig für solche Aufgaben verwendet (Becker 2006; Dietmayer 2006). Wegen der nicht benötigten expliziten Behandlung von Unwissen und des weniger intuitiven Zugangs wird die Dempster-Shafer-Theorie in dieser Arbeit nicht angewendet.

### 4.2.3 Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Logik

Die Fuzzy-Mengen-Theorie geht auf Zadeh (1965) zurück und beschreibt, in welchem Maß ein Objekt eine vage formulierte Eigenschaft erfüllt. Dabei wird die klassische zweiwertige Logik erweitert, sodass ein Wahrheitswert aus dem Intervall  $[0, 1]$  möglich ist. Beobachtet man beispielsweise während der Fahrt auf einer Landstraße ein Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 90 km/h, so fällt es allgemein schwer, das Fahrzeug in eine der Kategorien *schnell* oder *langsam* einzuordnen. Dies liegt jedoch nicht an der Unsicherheit über den Bewegungszustand, sondern lediglich an der Unschärfe der linguistischen Werte *schnell* und *langsam*. Es handelt sich daher um ein Problem der *Vagheit* und nicht der Unsicherheit. Um graduelle Mengenzugehörigkeiten zu ermöglichen, werden als Zugehörigkeitsfunktionen  $\mu_i(x)$  häufig Dreiecks-, Trapez- oder Gauß-Funktionen verwendet (Nauck u. a. 1994). Nach der Bestimmung einzelner Zugehörigkeitswerte (*Fuzzifizierung*) können aus mehreren Zugehörigkeitswerten komplexe Sätze gebildet werden. Die Operationen auf Fuzzy-Mengen sind Teil der *Fuzzy-Logik*. Zur Ermittlung eines Gesamtwahrheitswerts aus den einzelnen Wahrheitswerten  $T(A)$  und  $T(B)$  werden üblicherweise folgende Regeln angewendet (Russell und Norvig 2004):

$$T(A \wedge B) = \min(T(A), T(B)) \quad (4.1)$$

$$T(A \vee B) = \max(T(A), T(B)) \quad (4.2)$$

$$T(\neg A) = 1 - T(A) \quad (4.3)$$

Diese komplexeren Sätze stellen die Prämissen der Regelbasis des Fuzzy-Systems dar. Durch einen Satz von Regeln wird – vergleichbar mit denen regelbasierter Systeme – das Verhalten eines Systems beschrieben. Nach

Auswerten der Prämisse muss der Gesamtwahrheitswert  $T_{Prämisse}$  mit der Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_A$  der Ausgangsgröße verknüpft werden (*Inferenz*). Dafür werden häufig die Minimum-Methode ( $\min \{T_{Prämisse}, \mu_A\}$ ) oder die Produkt-Methode ( $T_{Prämisse} \cdot \mu_A$ ) verwendet. Anschließend werden die Ergebnisse für alle Regeln komponiert (häufig Maximumbildung). Um eine diskrete Ausgangsgröße zu erzeugen (*Defuzzifizierung*), wird meist der Schwerpunkt der Gesamtzugehörigkeitsfunktion verwendet.

Seraphin (1994) gibt einen Überblick über wesentliche Eigenschaften von Fuzzy-Systemen. Demnach sind Fuzzy-Systeme dann gut geeignet, wenn kein mathematisches Modell des Systems verfügbar ist, aber Wissen in Form von Regeln vorliegt. Fuzzy-Systeme zeichnen sich durch die Möglichkeit zur schnellen Implementierung aus, allerdings ergeben sich häufig Schwierigkeiten bei der Feinabstimmung, da dafür keine formalen Methoden existieren.<sup>5</sup>

### Grenzen wahrheitsfunktionaler Systeme

Aus den Sätzen (4.1) bis (4.3) geht hervor, dass die Fuzzy-Logik ein wahrheitsfunktionales System ist. Das Wissen solcher Systeme kann in Regeln der Form  $A \Rightarrow B$  formalisiert werden. Sucht man ein allgemeines Werkzeug zum Schlussfolgern, sollte sowohl kausales (Ursache  $\Rightarrow$  Wirkung) als auch diagnostisches Schließen (Wirkung  $\Rightarrow$  Ursache) möglich sein.

Wird beispielsweise ein System zur Diebstahlwarnung eines Fahrzeugs betrachtet, so können folgende Zustände von Interesse sein: *Abschleppen*, *Einbruch* und *Alarm*. Dabei sei angenommen, dass sowohl das Abschleppen eines Fahrzeugs als auch der Einbruch in das Fahrzeug die Alarmanlage zur Auslösung bringen können. Bei beliebiger Schlussfolgerungsrichtung müssen folgende Regeln berücksichtigt werden:

$$\text{Abschleppen} \Rightarrow \text{Alarm} \quad (4.4)$$

$$\text{Alarm} \Rightarrow \text{Abschleppen} \quad (4.5)$$

$$\text{Einbruch} \Rightarrow \text{Alarm} \quad (4.6)$$

$$\text{Alarm} \Rightarrow \text{Einbruch} \quad (4.7)$$

Wird nun beobachtet, dass ein Fahrzeug abgeschleppt wird, so verstärkt sich der Glaube darin, dass die Diebstahlwarnanlage auslöst (4.4). Dies erhöht wiederum den Glauben in einen Fahrzeugeinbruch (4.7). Dieses Verhalten erscheint nicht sinnvoll, denn die Tatsache, dass das Fahrzeug abgeschleppt

---

<sup>5</sup>Es gibt Ansätze, Fuzzy-Systeme um neuronale Netze zu erweitern und somit ein automatisches Verfahren zur Optimierung bereitzustellen (siehe auch Abschnitt 4.2.4).

wird, ist bereits eine gute Erklärung für den Alarm. Allgemein haben wahrheitsfunktionale Systeme Schwierigkeiten, interkausales Schließen korrekt abzubilden (Russell und Norvig 2004). Daher werden sie hier für eine Situationsanalyse nicht eingesetzt.

#### 4.2.4 Künstliche neuronale Netze

Künstliche neuronale Netze (KNN) werden in verschiedenen Domänen eingesetzt. In der Biologie dienen sie dazu, natürliche neuronale Netze nachzubilden. Im Bereich der angewandten Technik werden künstliche neuronale Netze als lernfähige, fehlertolerante Systeme verwendet (Rojas 1993). Eines der Hauptanwendungsgebiete ist dabei die Klassifizierung. Ein Beispiel aus dem Bereich der Mustererkennung ist die Schrifterkennung (Luger 2005), bei der ein zum Teil verrauschter Eingangsvektor in Form einer Pixelmatrix auf ein Zeichen eines definierten Alphabets abgebildet wird. Da verschiedene Schriftarten verarbeitet werden sollen, fällt es schwer, explizite Regeln für die Erkennung einzelner Buchstaben anzugeben. Das Fehlen eines mathematischen Modells bzw. Regelwerks ist charakteristisch für viele Fragestellungen, bei denen künstliche neuronale Netze zum Einsatz kommen. Wenn jedoch explizites Wissen über Gegebenheiten der Domäne vorhanden ist, besteht keine Möglichkeit dieses direkt einzubringen (Seraphin 1994). Das gewünschte Ein-/Ausgabe-Verhalten des Netzes wird durch einen Lernalgorithmus und eine Menge an Trainingsdaten erzeugt. Der Lernprozess stellt in der Regel ein hochdimensionales Optimierungsproblem dar, über dessen Lösung üblicherweise keine Aussage möglich ist, ob sie ein globales oder lediglich lokales Extremum darstellt.<sup>6</sup> Das trainierte Netz ist als ein abgeschlossenes System zu betrachten, dessen innere Funktionsweise weitgehend intransparent ist und daher Erweiterungen erschwert (Nauck u. a. 1994). Damit scheiden künstliche neuronale Netze als Verfahren im Rahmen dieser Arbeit aus.

### 4.3 Probabilistisches Schließen mit Bayes'schen Netzen

Bayes'sches Netze lassen sich als gerichtete azyklische Graphen (*directed acyclic graphs*, DAG) beschreiben und bestehen aus Knoten und Kanten (Russell und Norvig 2004). Die Knoten stellen die Zufallsvariablen und die

<sup>6</sup>Dies ist jedoch keine Eigenschaft künstlicher neuronaler Netze, sondern der Optimierung im Allgemeinen. Um die Ergebnisse zu verbessern, werden häufig mehrere Optimierungen mit verschiedenen Startwerten durchgeführt.

Kanten bedingte Abhängigkeiten zwischen den Variablen des beschriebenen Systems dar. Mit jedem Knoten werden mindestens zwei Hypothesen assoziiert. Sie bilden die möglichen Zustände einer Variable. Knoten, von denen eine Kante zu einem Knoten  $K$  führt, heißen *Eltern* von  $K$ . Knoten, zu denen eine Kante von  $K$  führt, werden *Kinder* von  $K$  genannt. Die Menge der Elternknoten muss für mindestens einen der Knoten des Netzes leer sein.<sup>7</sup> Nach ihrem Wertebereich  $\mathbf{W}$  der Zufallsvariablen können diskrete und kontinuierliche Zufallsvariablen unterschieden werden (Murphy 2002b):

**Diskrete Zufallsvariablen** Jede Zufallsvariable kann einen Wert aus einer abzählbaren Menge sich wechselseitig ausschließender Werte annehmen, d. h. das gleichzeitige Auftreten mehrerer Zustände *einer* Zufallsvariable ist ausgeschlossen. Die Menge muss erschöpfend sein, d. h. alle möglichen Zustände umfassen. Boolesche Zufallsvariablen bilden einen Spezialfall: der Wertebereich enthält lediglich die Elemente *wahr* und *falsch*.

**Kontinuierliche Zufallsvariablen** Der Wertebereich einer Zufallsvariable  $X$  umfasst die Menge der reellen Zahlen ( $\mathbf{W} = \mathbb{R}$ ) oder ein Intervall davon, d. h.  $X \in [x_{\min}, x_{\max}] \subset \mathbb{R}$ .

Eine Diskretisierung von teilweise kontinuierlichen Größen, die im Rahmen einer Situationsanalyse relevant sein können (z. B. Geschwindigkeit), stellt eine Abstraktion dar, die nicht nur besondere Inferenzalgorithmen ermöglicht (Abschnitt 4.3.3), sondern in Teilen der menschlichen Wahrnehmung entspricht, da viele Größen nicht kontinuierlich wahrgenommen werden (Wiedemann 1974). Daher werden im Folgenden diskrete Zufallsvariablen betrachtet. Für diskrete Zufallsvariablen erfordert jeder Knoten die Angabe von *bedingten Wahrscheinlichkeiten* seiner Zustände in Abhängigkeit aller Zustände seiner Eltern. Für Knoten, die keine Eltern besitzen, müssen *unbedingte Wahrscheinlichkeiten* (*A-priori-Wahrscheinlichkeiten*) der Zustände, d. h. unabhängig von sonstigen Zuständen, angegeben werden.

### Einführendes Beispiel: Diebstahlwarnanlage eines Fahrzeugs

Wenn man das Beispiel aus Abschnitt 4.2.3 erweitert, lässt sich das in Abbildung 4.3 dargestellte Bayes'sche Netz erzeugen. Knoten, deren Zustand durch Observation bekannt ist, sind schattiert dargestellt. Wie zuvor wird angenommen, dass der Alarm der Diebstahlwarnanlage durch einen Einbruch oder durch das Abschleppen des Fahrzeugs hervorgerufen werden kann. Weiterhin sei angenommen, dass im Fall eines Alarms ein Mitarbeiter des

---

<sup>7</sup>Dies ist eine notwendige aber nicht hinreichende Bedingung für Azyklizität.

### 4.3 Probabilistisches Schließen mit Bayes'schen Netzen

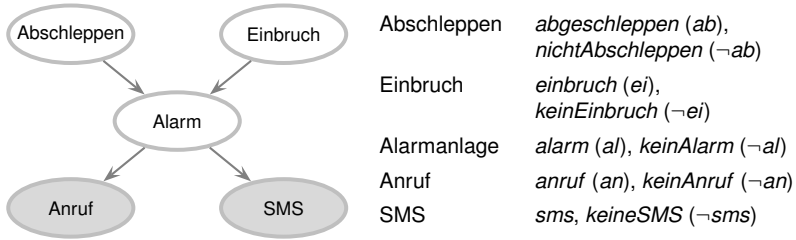


Abbildung 4.3: Beispiel eines Bayes'schen Netzes zur Ermittlung der Einbruchswahrscheinlichkeit (links) und die möglichen Zustände der einzelnen Knoten (rechts)

Gebäudeempfangs, der den Parkplatz einsehen kann, den Fahrer an seinem Arbeitsplatz anrufen kann. Darüber hinaus verfüge die Alarmanlage über die Funktionalität, eine Kurzmitteilung (SMS) zum Mobiltelefon des Besitzers zu versenden. Alle Kanten des Graphen sind mit Unsicherheit behaftet, d. h. das Abschleppen oder ein Einbruch in das Fahrzeug führen nicht immer zu einem Alarm. Beispielhaft sind die bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen für die Knoten *Alarm* und *Anruf* in Tabelle 4.1 dargestellt. Für die Variable *Anruf* kann abgelesen werden: Wenn der Alarm ausgelöst wurde, wird der Empfang in 75 % der Fälle den Besitzer anrufen und ihn informieren. Allerdings kann es vorkommen, dass ein Alarm unbemerkt bleibt oder ein Anruf aus einem anderen Grund nicht erfolgt. Ein Fahrzeugalarm ist jedoch nicht das einzige Ereignis, dass zu einem Anruf des Empfangs führt (30 %). Trifft beispielsweise ein Paket für den Fahrzeugbesitzer ein, so wird es am Empfang angenommen und der Empfänger wird benachrichtigt.

	$aI$	$\neg aI$				
$an$	0,75	0,30	$ab$		$\neg ab$	
	$ei$	$\neg ei$	$ei$	$\neg ei$	$ei$	$\neg ei$
$al$	0,99	0,75	0,90	0,05		
$\neg al$	0,01	0,25	0,10	0,95		

Tabelle 4.1: Bedingte Wahrscheinlichkeiten der Knoten *Anruf* (*a*) und *Alarm* (*b*): Alarm (*al*), Anruf (*an*), Abschleppen (*ab*), Einbruch (*ei*)

### 4.3.1 Wahrscheinlichkeitstheoretische Grundlagen

Im Folgenden werden die grundlegenden Begriffe der Wahrscheinlichkeitstheorie, die in dieser Arbeit von Bedeutung sind, erläutert. Zunächst sollen die im Beispiel informell eingeführten Begriffe der diskreten Zufallsvariable und der Wahrscheinlichkeitsverteilung definiert werden. Für die *Zufallsvariable*  $X$  gilt:

$$X = x_i \quad \text{für } x_i \in \mathbb{R} \text{ und } i \in \mathbb{N}. \quad (4.8)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Zufallsvariable  $X$  einen Wert  $x$  annimmt, wird durch die diskrete *Wahrscheinlichkeitsverteilung* angegeben:

$$\mathbf{P}(X = x) = p_i \quad \text{für } x = x_i \quad (4.9)$$

Bei der Verwendung von Bayes'schen Netzen ist der Begriff der bedingten Wahrscheinlichkeit (*A-posteriori-Wahrscheinlichkeit*) von zentraler Bedeutung. Sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit  $\mathbf{P}(X | Y)$  eines Zustands  $X$  bei der Beobachtung des Zustands  $Y$ . Bedingte Wahrscheinlichkeiten lassen sich durch unbedingte Wahrscheinlichkeiten ausdrücken. Der Ausdruck  $\mathbf{P}(X, Y)$  bezeichnet dabei die Wahrscheinlichkeit für das gleichzeitige Auftreten von  $X$  und  $Y$ .

$$\mathbf{P}(X | Y) = \frac{\mathbf{P}(X, Y)}{\mathbf{P}(Y)} \quad \text{mit } \mathbf{P}(Y) \neq 0. \quad (4.10)$$

In äquivalenter Form wird dieser Ausdruck als *Produktregel* bezeichnet:

$$\mathbf{P}(X, Y) = \mathbf{P}(X | Y) \cdot \mathbf{P}(Y) \quad \text{und ebenso} \quad (4.11)$$

$$\mathbf{P}(Y, X) = \mathbf{P}(Y | X) \cdot \mathbf{P}(X). \quad (4.12)$$

Wegen der Gleichheit von  $\mathbf{P}(X, Y)$  und  $\mathbf{P}(Y, X)$  lässt sich aus den Gleichungen (4.11) und (4.12) herleiten:

$$\mathbf{P}(X | Y) \cdot \mathbf{P}(Y) = \mathbf{P}(Y | X) \cdot \mathbf{P}(X). \quad (4.13)$$

Daraus erhält man die *Bayes'sche Regel* (Bayes 1763):

$$\mathbf{P}(X | Y) = \frac{\mathbf{P}(Y | X) \cdot \mathbf{P}(X)}{\mathbf{P}(Y)} \quad \text{mit } \mathbf{P}(Y) \neq 0. \quad (4.14)$$

Durch diese Berechnungsvorschrift ist es möglich, auf die Wahrscheinlichkeiten der Zustände von  $X$  zu schließen, wenn man bei Kenntnis der bedingten Wahrscheinlichkeiten den aus  $X$  resultierenden Effekt  $Y$  beobachtet.



Die Schlussfolgerungsrichtung ist also diagnostisch, die Angabe der Übergangswahrscheinlichkeiten erfolgt in kausaler Richtung. Dies ist von Vorteil, da kausales Wissen weniger subtil ist als diagnostisches.<sup>8</sup> An dieser Stelle wird deutlich, warum Bayes'schen Netze keine Ringschlüsse enthalten können: in einem Zyklus sind die Begriffe *Ursache* und *Wirkung* nicht sinnvoll.

Liegen nun mehrere Effektbeobachtungen, z. B.  $Y_1$  und  $Y_2$ , bezüglich einer möglichen Ursache  $X$  vor, so ist die Wahrscheinlichkeit  $\mathbf{P}(X \mid Y_1, Y_2)$  zu ermitteln. Um diesen Ausdruck vereinfachen zu können, sind Annahmen über die Unabhängigkeit der Variablen notwendig. Dieses Konzept kann gut an dem Beispiel der Diebstahlwarnanlage nachvollzogen werden (siehe Abbildung 4.3). Reduziert man die Situation um die oberste Ebene (*Abschleppen, Einbruch*), kann die Frage nach der Wahrscheinlichkeit eines Alarms gestellt werden, wenn die Zustände der Knoten *Anruf* und *SMS* bekannt sind. Dabei wäre es hilfreich, wenn die Knoten *Anruf* und *SMS* unabhängig voneinander wären. Dies scheint nicht in jedem Fall zu gelten, denn sobald der Besitzer eine SMS der Alarmanlage erhält, ist ein Fahrzeugalarm wahrscheinlich. Dies wiederum lässt die Wahrscheinlichkeit für einen Anruf des Empfangs steigen. Nimmt man jedoch an, der Zustand des Knotens *Alarm* sei bekannt, kann Unabhängigkeit für die Knoten *Anruf* und *SMS* angenommen werden, da die Alarmanlage beim Versenden einer Kurzmitteilung keine Rücksicht darauf nimmt, ob der Empfang einen Anruf tätigt oder nicht. Auf der anderen Seite ist das Verhalten eines Empfangsmitarbeiters unabhängig davon, ob die Alarmanlage eine Nachricht versendet oder nicht.<sup>9</sup> Dieser Zusammenhang wird als *bedingte Unabhängigkeit* bezeichnet.

Bedingte Unabhängigkeit von  $Y_1$  und  $Y_2$  bei bekanntem  $X$  lässt sich folgendermaßen ausdrücken:

$$\mathbf{P}(Y_1, Y_2 \mid X) = \mathbf{P}(Y_1 \mid X) \cdot \mathbf{P}(Y_2 \mid X) . \quad (4.15)$$

Ein Bayes'sches Netz ist nur dann eine korrekte Repräsentation der Domäne, wenn jeder Knoten bedingt unabhängig von seinen Vorgängern in der Knotenreihenfolge ist und seine Eltern bekannt sind, d. h. *Evidenz* vorliegt. Solche Unabhängigkeitsannahmen basieren in der Regel auf Wissen aus der repräsentierten Domäne. Selbst wenn diese Annahmen nicht streng erfüllt werden, zeigen entsprechende Bayes'sche Netze oft gute Ergebnisse (Elkan 1997). In der Praxis wird teils nachlässig mit den Unabhängigkeitsforderun-

<sup>8</sup>Erfahrene Ärzte können beispielsweise besser Wahrscheinlichkeitsbeurteilungen für kausale als für diagnostische Regeln abgeben (Tversky und Kahnemann 1982).

<sup>9</sup>Dies wäre nicht der Fall, wenn der Knoten *Anruf* einen Anruf der Diebstahlwarnanlage repräsentieren würde.

gen bei der Erzeugung von Bayes'schen Netzen umgegangen. Solche Bayes-Modelle werden dann *naiv* oder *Bayes-Klassifizierer* genannt.

### 4.3.2 Eigenschaften Bayes'scher Netze

Bayes'sche Netze haben den Vorteil, dass explizites Wissen über die Struktur des Netzes und die Angabe von Übergangswahrscheinlichkeiten eingebracht werden kann:

**Variablen** Durch die Auswahl der zu berücksichtigen Variablen kann Wissen über die relevanten Einflussfaktoren eingebracht werden.

**Struktur** Die Struktur des Netzes hat qualitativen Einfluss auf die Auswertung. Sie beinhaltet welche Knoten untereinander verbunden sind und die Orientierung der Verbindungen.

**Übergangswahrscheinlichkeiten** Die bedingten Wahrscheinlichkeiten quantifizieren den Einfluss, den ein Knoten auf seine Kindknoten hat.

Diese Möglichkeiten zum Einbringen von Wissen erleichtern das Verständnis der Netze und ermöglichen gezielte Modifikationen. Durch den Aufbau von Netzen, bei denen Annahmen über bedingte Unabhängigkeit berücksichtigt wurden, ergeben sich außerdem große Vorteile gegenüber vollständigen gemeinsamen Verteilungen. Dies soll an einem einfachen Beispiel mit vier boolesche Zufallsvariablen ( $S, Y_{1..3}$ ) erläutert werden. Tabelle 4.2 zeigt die vollständige gemeinsame Verteilung, die alle möglichen Konfigurationen mit der entsprechenden Auftretenswahrscheinlichkeit aufführt. Da der Konfigurationsraum vollständig ist, muss gelten:

$$\sum_{i=1}^k p_i = 1. \quad (4.16)$$

Aus einer vollständigen gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsverteilung lassen sich bedingte Wahrscheinlichkeiten nach Gleichung (4.10) berechnen. Dieser Vorgang wird *Marginalisierung* genannt. Allgemein erfordert die vollständige gemeinsame Verteilung von  $k$  booleschen Zufallsvariablen die Angabe von  $2^k - 1$  Wahrscheinlichkeiten. Allein aufgrund der exponentiellen Zunahme der erforderlichen Parameter scheint dieses Vorgehen ungünstig.

Im Folgenden werden zwei hinsichtlich ihres Aufbaus extremale zweistufige Bayes'sche Netze für den selben Sachverhalt untersucht. Im Fall von Abbildung 4.4a besteht das Netz aus drei Elternknoten mit einem gemeinsamen

### 4.3 Probabilistisches Schließen mit Bayes'schen Netzen

	$Y_1$				$\neg Y_1$			
	$Y_2$		$\neg Y_2$		$Y_2$		$\neg Y_2$	
	$Y_3$	$\neg Y_3$	$Y_3$	$\neg Y_3$	$Y_3$	$\neg Y_3$	$Y_3$	$\neg Y_3$
$S$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_7$	$p_8$
$\neg S$	$p_9$	$p_{10}$	$p_{11}$	$p_{12}$	$p_{13}$	$p_{14}$	$p_{15}$	$p_{16}$

Tabelle 4.2: Vollständige gemeinsame Verteilung eines Ereignisses  $S$  in Abhängigkeit von drei Variablen ( $Y_1, Y_2, Y_3$ )

Kindknoten. Es sind drei A-priori-Wahrscheinlichkeiten,  $p(x_{1...3})$ , sowie die Übergangswahrscheinlichkeiten (Tabelle 4.3) erforderlich, um das Netz bei gegebener Struktur vollständig zu bestimmen. Insgesamt sind in diesem Fall elf Parameter anzugeben.

Im Fall einer Struktur nach Abbildung 4.4b entsteht bezüglich der Anzahl an zu ermittelnden Übergangswahrscheinlichkeiten eine optimale Struktur. Neben der A-priori-Wahrscheinlichkeit  $\tilde{p}_7$  für den Zustand  $s$  ist für jeden Kindknoten eine Tabelle mit jeweils zwei Parametern notwendig. Diese Struktur erfordert damit lediglich sieben Wahrscheinlichkeitswerte (vgl. Tabelle 4.4).

Die Wahl der Struktur sollte abhängig von dem zu modellierenden Sachverhalts getroffen werden. Weist ein Netz bei gleichen Zufallsvariablen keine kausalen Verbindungen auf, so führt dies häufig zu einer hohen Anzahl an Verbindungen zwischen den Knoten, deren Wahrscheinlichkeiten schwierig anzugeben sind. Wie sich die Qualität der Übergangswahrscheinlichkeiten ändert, wird deutlich, wenn man erneut das Beispiel der Diebstahlwarnanlage betrachtet (Abbildung 4.3). Wenn hier der Knoten *Anruf* Elternknoten von *Alarm* wäre, müsste eine Angabe für die Wahrscheinlichkeit gemacht werden,

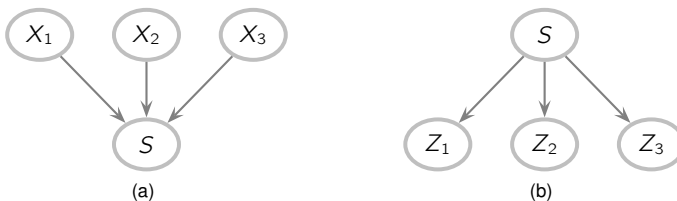


Abbildung 4.4: Beispiele von zweistufigen Bayes'schen Netzen mit ungünstiger (a) bzw. günstiger (b) Struktur bezüglich der erforderlichen Anzahl von Parametern

dass die Alarmanlage ausgelöst wurde, wenn ein Mitarbeiter des Empfangs anruft. Solche Wahrscheinlichkeiten sind wegen ihrer Akausalität schlecht abzuschätzen. Weitere Beispiele für günstige und ungünstige Netzstrukturen werden in Abschnitt 4.5 gegeben.

Ein intuitiver Zugang zu den erforderlichen Übergangswahrscheinlichkeiten ist von großer Bedeutung, da es im Wesentlichen nur zwei Quellen für sie gibt. Nach Charniak (1991) sind dies:

- Trainingsdaten
- Expertenwissen

Im Fall von Trainingsdaten stehen vollständige oder unvollständige Beobachtungsdaten für die Zustände des aufgebauten Netzes zur Verfügung. Aus ihnen können die Übergangswahrscheinlichkeiten je nach Struktur und Beobachtungsgrad exakt oder näherungsweise ermittelt werden. Die Fähigkeit Parameter durch Lernen zu ermitteln, ist ein großer Vorteil Bayes'scher Netze (Gerdes 2006b). Für Fälle, in denen keine Trainingsdaten vorliegen, kann Expertenwissen für die Ermittlung von Übergangswahrscheinlichkeiten herangezogen werden. Außerdem lassen sich Wenn-Dann-Regeln durch explizite Angabe von Wahrscheinlichkeiten nachbilden. Neben den Übergangswahrscheinlichkeiten lassen sich auch Netzstrukturen aus Trainingsdaten ableiten. Solche in erster Linie datengetriebenen Verfahren grenzen sich dadurch von den modellbasierten Verfahren ab (McCall u. a. 2007). Das Lernen von Strukturen führt jedoch selten zu kausalen Netzen. Dies macht eine Weiterentwicklung und Veränderung von Parametern schwierig. Bayes'sche Netzen scheinen aufgrund ihrer Eigenschaften für eine Situationsanalyse hinsichtlich des nächsten Manövers des Fahrers gut geeignet und werden daher vertiefend betrachtet. Tabelle 4.5 fasst abschließend die Eigenschaften der untersuchten Methoden für eine Situationsanalyse zusammen.

	$x_1$				$\neg x_1$			
	$x_2$	$\neg x_2$	$x_3$	$\neg x_3$	$x_2$	$\neg x_2$	$x_3$	$\neg x_3$
$s$	$\hat{p}_1$	$\hat{p}_2$	$\hat{p}_3$	$\hat{p}_4$	$\hat{p}_5$	$\hat{p}_6$	$\hat{p}_7$	$\hat{p}_8$
$\neg s$	$1 - \hat{p}_1$	$1 - \hat{p}_2$	$1 - \hat{p}_3$	$1 - \hat{p}_4$	$1 - \hat{p}_5$	$1 - \hat{p}_6$	$1 - \hat{p}_7$	$1 - \hat{p}_8$

Tabelle 4.3: Matrix der Übergangswahrscheinlichkeiten  $P(S | X_1, X_2, X_3)$

### 4.3 Probabilistisches Schließen mit Bayes'schen Netzen

	$s$	$\neg s$
$z_1$	$\tilde{p}_1$	$\tilde{p}_2$
$\neg z_1$	$1 - \tilde{p}_1$	$1 - \tilde{p}_2$

(a)

	$s$	$\neg s$
$z_2$	$\tilde{p}_3$	$\tilde{p}_4$
$\neg z_2$	$1 - \tilde{p}_3$	$1 - \tilde{p}_4$

(b)

	$s$	$\neg s$
$z_3$	$\tilde{p}_5$	$\tilde{p}_6$
$\neg z_3$	$1 - \tilde{p}_5$	$1 - \tilde{p}_6$

(c)

$s$	$\tilde{p}_7$
$\neg s$	$1 - \tilde{p}_7$

(d)

Tabelle 4.4: Übergangswahrscheinlichkeiten der Knoten  $Z_1$  (a),  $Z_2$  (b),  $Z_3$  (c) und A-priori-Wahrscheinlichkeiten des Elternknotens  $S$  (d)

#### 4.3.3 Inferenz in Bayes'schen Netzen

In diesem Abschnitt wird gezeigt werden, wie aus der Beobachtung von Knoten auf die Wahrscheinlichkeit der Zustände anderer Knoten geschlossen werden kann. Der Vorgang des Schlussfolgerns wird als *Inferenzbildung* bezeichnet. Der Komplexitätsgrad und die erreichbare Exaktheit der Inferenz hängen maßgeblich von der Struktur des Bayes'schen Netzes ab. Dabei sind folgende Typen zu unterscheiden:

- einfach verbundene Netze (*Polybäume*),
- mehrfach verbundene Netze.

Einfach verbundene Netze (Abbildung 4.5a) sind dadurch charakterisiert, dass es keine zwei ungerichteten Pfade zwischen zwei beliebigen Knoten des Netzes gibt. Für solche Polybäume ist exakte Inferenz möglich. Im Fall mehrfach verbundener Netze (Abbildung 4.5b) ist dies nicht garantiert. Hier kann die Inferenzbildung exponentielle Zeit- und Speicherkomplexität aufweisen und kann unter Umständen nicht handhabbar sein. Daher kommen für die Inferenz in mehrfach verbundenen Netzen Näherungsverfahren zum Einsatz, die auf zufällig angeordneten Stichproben (*Monte-Carlo-Algorithmen*) basieren.

Für die Inferenzbildung ist die Abhängigkeit von Knoten und Knotengruppen wesentlich. In unabhängigen Gruppen können Schlussfolgerungen lokal gezogen werden. Um Unabhängigkeit nachzuweisen existieren verschiedene

Methoden		Eigenschaften
Logik	⊕	Gute Nachvollziehbarkeit, gute Abbildung menschlichen Wissens
	⊖	Keine Behandlung von Unsicherheit, Schwierigkeiten bei interkausalem Schließen
Dempster-Shafer Evidenztheorie	⊕	Behandlung von Unsicherheit
	⊖	Wenig intuitiver Zugang bei Kombination von Hypothesen
Fuzzy-Logik	⊕	Lernfähigkeit, intuitiver Zugang
	⊖	Schwierigkeiten bei interkausalem Schließen, Feinabstimmung schwierig
Künstliche neuronale Netze	⊕	Lernfähigkeit
	⊖	Wenig transparentes Verhalten, schlechte Integration von explizitem Wissen
Bayes'sche Netze	⊕	Behandlung von Unsicherheit, Lernfähigkeit auf mehreren Ebenen, intuitiver Zugang
	⊖	Angabe von A-priori-Wahrscheinlichkeiten

Tabelle 4.5: Übersicht zu den Vor- und Nachteilen der betrachteten Methoden für eine Situationsanalyse zur Erkennung von Fahrsituationen

Verfahren, die jeweils unterschiedliche Kriterien untersuchen. Ein eingängiges topologisches Kriterium für die Unabhängigkeit lautet nach [Russell und Norvig \(2004\)](#):

Ein Knoten ist bedingt unabhängig von *allen anderen* Knoten des Netzes, wenn seine *Markov-Decke* bekannt ist.

Die Markov-Decke eines Knotens besteht aus seinen Eltern- und Kindknoten sowie den Elternknoten seiner Kinder (siehe Abbildung 4.6a).

Bezüglich der Netztopologie werden in dieser Arbeit (siehe Abschnitt 4.5) Netze mit einer Struktur nach Abbildung 4.6b verwendet. Es handelt sich um Netze mit einem zentralen Knoten  $S$ , dessen Zustand unbekannt ist und der eine endliche Menge an Eltern- und Kindknoten besitzt. Die Zustände der Eltern- und Kindknoten werden beobachtet und sind damit bekannt. Die Menge der Elternknoten wird mit  $X_1 \dots X_k$  bezeichnet. Jeder Knoten  $X_i$  hat dabei  $m_i$  mögliche Zustände  $(x_{i1} \dots x_{im_i})$ . Der interessierende Knoten  $S$  weist die Zustände  $s_1 \dots s_r$  auf. Analog zur Nomenklatur der Elternknoten werden die

### 4.3 Probabilistisches Schließen mit Bayes'schen Netzen

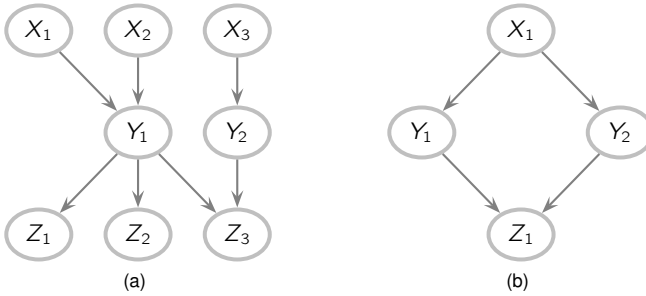


Abbildung 4.5: Beispiel eines einfach verbundenen (a) und eines mehrfach verbundenen (b) Bayes'schen Netzes

Kindknoten von  $S$  mit  $Z_1 \dots Z_l$  bezeichnet. Jeder Kindknoten  $Z_j$  kann dabei die Zustände  $z_{j1} \dots z_{jn_j}$  annehmen. Es handelt sich bei der gewählten Netzstruktur um ein einfach verbundenes Netz, für das exakte Inferenzbildung möglich ist und das deterministisches Verhalten aufweist.

Der Inferenzmechanismus für solche Netzstrukturen kann in zwei Schritte untergliedert werden:

1. Ermittlung des kausalen Einflusses der Elternknoten,
2. Berechnung der Wahrscheinlichkeiten der Zustände des Knotens  $S$  unter Berücksichtigung des diagnostischen Einflusses der Kindknoten.

Um diese Schritte zu erläutern, wird zunächst eine Untermenge der Netze nach Abbildung 4.6b betrachtet. Es wird angenommen, dass die Elternebene, d.h. die Knoten  $X_1 \dots X_k$ , nicht existent ist. In diesem Fall kann die Wahrscheinlichkeit eines Zustands  $s_u$  des Knoten  $S$  aus den A-priori-Wahrscheinlichkeiten der Zustände und den bedingten Wahrscheinlichkeiten der Kindknoten mit Hilfe der Bayes'schen Regel (Gleichung 4.14) berechnet werden:

$$P(S = s_u | Z_1 \dots Z_l) = \frac{P(s_u) \cdot \prod_{i=1}^l P(Z_i | s_u)}{\sum_{j=1}^r P(s_j) \cdot \prod_{i=1}^l P(Z_i | s_j)} \quad \text{mit } 1 \leq u \leq r \quad (4.17)$$

Diese Berechnung spiegelt den diagnostischen Einfluss (Schritt 2) wider. Liegt eine Struktur entsprechend Abbildung 4.6b vor, so gibt es keine A-priori-Wahrscheinlichkeiten  $P(S)$  des Knoten  $S$ . Der Inferenzalgorithmus muss deshalb um Schritt 1, die Ermittlung des kausalen Einflusses der Eltern, erweitert werden. An die Stelle der A-priori-Wahrscheinlichkeit  $P(s_u)$  kann – je nach

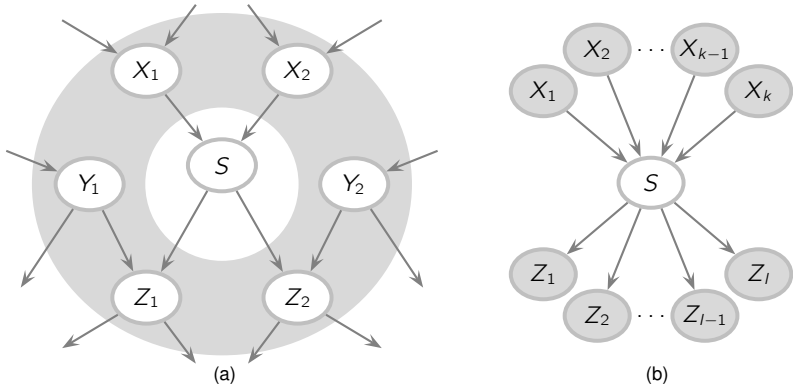


Abbildung 4.6: Markov-Decke (grau) eines Knotens  $S$  (a) (Russell und Norvig 2004) und die Struktur der verwendeten Bayes'schen Netze (b)

Beobachtungsgrad der Elternebene ( $X_{1\dots k}$ ) – ein mit den A-priori-Wahrscheinlichkeiten dieser Knoten gewichteter Mittelwert der Übergangswahrscheinlichkeiten von  $S$  treten:

$$P(S = s_u | X_{1\dots k}) = \sum_{i=1}^{m_1} \dots \sum_{j=1}^{m_k} P(s_u | X_{1i} \dots X_{kj}) \cdot P(X_{1i} \dots X_{kj}) \quad (4.18)$$

Für den Fall einer vollständig observierten Elternebene kann die Entsprechung der A-priori-Wahrscheinlichkeiten<sup>10</sup> in Gleichung (4.17) direkt aus der  $k+1$ -dimensionalen Übergangswahrscheinlichkeitstabelle abgelesen werden. Gemessen am Rechenaufwand vergleichbarer Dempster-Shafer-Modelle bieten Bayes'sche Netze den Vorteil geringerer Rechenkomplexität (Koks und Challa 2005).

## 4.4 Dynamische Bayes'sche Netze

Die bisher vorgestellten Bayes'schen Netze sind *statisch*, d.h. sie berücksichtigen nicht, dass sich das Verhalten von Systemen im zeitlichen Verlauf

<sup>10</sup>Diese werden für die hier erläuterte Struktur im Weiteren als *Quasi-A-priori-Wahrscheinlichkeiten* bezeichnet.



ändern kann. Für die Beschreibung von Fahrmanövern sind temporale Gegebenheiten oft von großer Bedeutung. Soll beispielsweise eine Vorhersage getroffen werden, ob ein auf einer Autobahn beobachtetes Fahrzeug einen Fahrstreifenwechsel nach rechts durchführen wird, sollte berücksichtigt werden, ob dieses Fahrzeug zuvor ein langsames Fahrzeug passiert hat. Um derartige Effekte abbilden zu können, erweitern dynamische Bayes'sche Netze die statische Variante um die Dimension Zeit. Die kontinuierliche Größe Zeit wird dazu in Intervalle gleicher Breite, so genannte Zeitscheiben, eingeteilt. Dynamische Modelle entstehen nun dadurch, dass jede Zeitscheibe ein Bayes'sches Netz beinhaltet und außerdem Kanten zwischen den Knoten in verschiedenen Zeitscheiben existieren (*temporale Kanten*). Diese Kanten zeigen dabei stets von einem Knoten in einer Zeitscheibe  $k$  zu einem Knoten in einer Scheibe  $l$  wobei gilt, dass  $k < l$ . Damit ist sichergestellt, dass keine Abhängigkeit der Vergangenheit von der Zukunft modelliert wird.

Grundsätzlich werden bei temporaler Inferenz, d. h. der Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilung  $\mathbf{P}(X | Y)$ , verschiedene Ausprägungen unterschieden. Es sei  $X^{t_k}$  die Zufallsvariable  $X$  in der Zeitscheibe  $k$ , d. h. zum Zeitpunkt  $t_k$ :

**Filtern** Ermittlung der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung über den aktuellen Zustand (Zeitpunkt  $t_k$ ) unter Berücksichtigung von Informationen aus der Vergangenheit und der Gegenwart, also  $\mathbf{P}(X^{t_k} | Y^{t_{1...k}})$  für  $i < k$ . Hierzu zählen z. B. Aufgaben aus dem Bereich der Sensordatenfusion ([Gerdess 2006c](#)).

**Vorhersage** Aus Beobachtungen der Vergangenheit und des aktuellen Zustands soll eine Aussage über die Zukunft getroffen werden. Gesucht ist damit  $\mathbf{P}(X^{t_l} | Y^{t_{1...k}})$  für  $i < k < l$ .

**Glättung** Hierbei soll die Wahrscheinlichkeit eines vergangenen Zustands mittels aktueller Beobachtungen und Kenntnis der Vergangenheit ermittelt werden:  $\mathbf{P}(X^j | Y^{t_{1...t_k}})$  für  $i < j < k$ .

**Wahrscheinlichste Erklärung** Für eine Folge von Beobachtungen soll eine Zustandsfolge ermittelt werden, die diese Beobachtungen am wahrscheinlichsten erzeugt hat. Diese kann von der Aneinanderreihung der jeweils für sich wahrscheinlichsten Zustände abweichen.<sup>11</sup>

Für eine vollständige Systemmodellierung sind bei Berücksichtigung temporaler Effekte prinzipiell unendlich viele Zeitscheiben erforderlich. Dies hätte

<sup>11</sup>Der Unterschied wird besonders bei der Spracherkennung deutlich, bei der ein zu erkennender

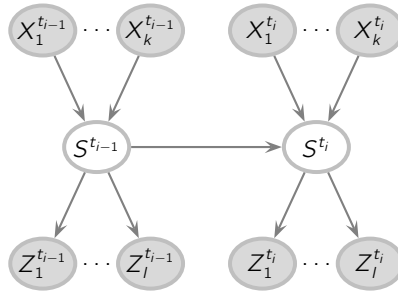


Abbildung 4.7: Beispiel eines entrollten dynamischen Bayes'schen Netzes mit einer temporalen Kante

eine unendliche Anzahl an Knoten und Kanten mit einer unendlichen Menge an Übergangswahrscheinlichkeiten und Knotenzuständen zur Folge. Jedoch erfüllen zu modellierende Systeme meist einige Bedingungen, die vereinfachende Annahmen rechtfertigen. Wenn die Zusammenhänge, d. h. Zufallsvariablen und ihre Verknüpfungen, für verschiedene Zeitscheiben identisch sind, so handelt es sich bei dem System um einen *stationären Prozess*. Dann ist es für die Beschreibung ausreichend, eine repräsentative Zeitscheibe zu betrachten. Eine Sonderstellung hat hier lediglich die erste Zeitscheibe, da sie keine Vorgängerknoten besitzt und somit die Angabe zusätzlicher unbedingter Wahrscheinlichkeiten erfordert. Es gilt für die Übergangswahrscheinlichkeiten eines stationären Prozesses:

$$\mathbf{P}(S^{t_i} \mid X^{t_i}, S^{t_{i-1}}) = \text{const} \quad \forall \{i \mid i > 0\} . \quad (4.19)$$

Eine weitere Vereinfachung ergibt sich aus der Tatsache, dass meist nur eine zeitliche Abhängigkeit über eine endliche Menge an Zeitscheiben vorliegt. Dies wird durch die so genannte *Markov-Annahme* ausgedrückt. Die Ordnung der Markov-Annahme drückt dabei die Anzahl der Zeitscheiben aus, die über die aktuelle Zeitscheibe hinaus für die Inferenzbildung relevant sind. Hängt die Zukunft eines Zustands nur vom aktuellen Zustand und nicht von der Vergangenheit ab, handelt es sich um einen *Markov-Prozess 1. Ordnung*. Das heißt:

$$\mathbf{P}(X^{t_i} \mid X^{t_{0..i-1}}) = \mathbf{P}(X^{t_i} \mid X^{t_{i-1}}) .$$

Abbildung 4.7 zeigt ein Beispiel für ein dynamisches Bayes'sches Netz. Hier hängt die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Knotens  $S$  für einen Inferenzzeit-

---

Satz nicht zwangsläufig aus der Folge der wahrscheinlichsten Worte besteht, wenn dadurch

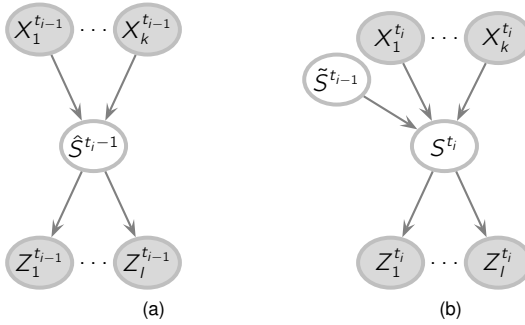


Abbildung 4.8: Rückführung des entrollten dynamischen Bayes'schen Netzes (Abbildung 4.7) auf ein statisches Äquivalent (b), dafür notwendiges temporäres Netz (a)

punkt  $t_i$  nicht nur von Zufallsvariablen derselben Zeitscheibe, sondern auch der vorherigen Zeitscheibe  $t_{i-1}$  ab. Damit kann berücksichtigt werden, dass nicht alle Zustandsübergänge innerhalb von  $S$  gleichermaßen wahrscheinlich sind.

### Inferenz in dynamischen Bayes'schen Netzen

Für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten dynamischen Bayes'schen Netze können nach geeigneten Umformungen dieselben Inferenzalgorithmen wie für statische Netze angewendet werden. Dazu wird das entrollte dynamische Bayes'sche Netz (Abbildung 4.7) in zwei Netze aufgeteilt (Abbildung 4.8). Im Zeitschritt  $t_{i-1}$  wird zunächst die Wahrscheinlichkeit der Zustände von  $\hat{S}^{t_{i-1}}$  ermittelt. Zum eigentlichen Inferenzzeitpunkt  $t_i$  liegt bereits Kenntnis über die Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $\hat{S}^{t_{i-1}}$  vor. Wenn diese Wahrscheinlichkeitsverteilung aus dem Zeitschritt  $t_{i-1}$  für die A-priori-Wahrscheinlichkeiten von  $\tilde{S}^{t_i}$  verwendet wird, kann die Zufallsvariable  $\tilde{S}^{t_{i-1}}$  wie die Knoten  $X_1^{t_i}, \dots, X_k^{t_i}$  behandelt werden. Dadurch entsteht eine äquivalente Darstellung des dynamischen Bayes'schen Netzes (Abbildung 4.8b), für die wie in Abschnitt 4.3.3 vorgefahren werden kann. Anhang A stellt die Äquivalenz im Detail dar.

## 4.5 Netztopologie zur Situationsanalyse

---

unsinnige Sätze gebildet würden.

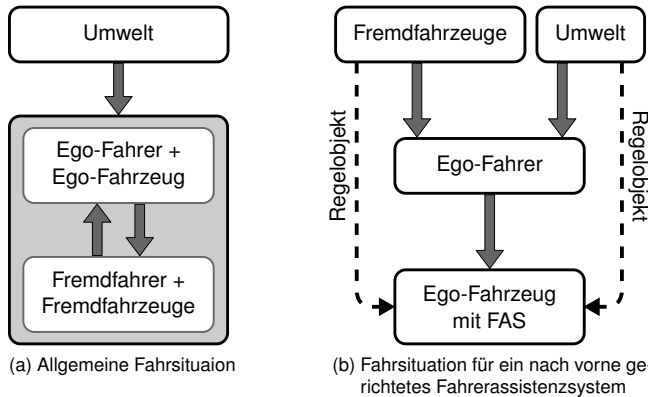


Abbildung 4.9: Verschiedene Sichten auf eine Fahrsituation: mit (a) bzw. ohne (b) wechselseitige Beeinflussung der Fahrzeuge

Eine Fahrsituation besteht im Allgemeinen aus dem wechselseitigen Wirken der Verkehrsteilnehmer mit ihren Fahrzeugen unter Einflüssen der Umwelt, die hier neben Witterungsverhältnissen z. B. auch die Infrastruktur repräsentiert (Abbildung 4.9a). Dazu zählen die Art der Straße, Verkehrszeichen, Markierungen, Lichtzeichenanlagen oder die Straßenrandbebauung. Für nach vorne orientierte Fahrerassistenzsysteme vereinfacht sich der Sachverhalt. So beeinflussen die vor dem eigenen Fahrzeug befindlichen Fahrzeuge maßgeblich das Verhalten des eigenen Fahrzeugs. Im Fall von Adaptive Cruise Control wird aus den vorausfahrenden Fahrzeugen das Regelobjekt ausgewählt, zu dem das ACC-System den gewünschten Abstand einhält. Die Rückwirkung auf die Vorderfahrzeuge durch das eigene Fahrzeug ist hingegen vernachlässigbar (Abbildung 4.9b). Durch das Wirken von Fremdfahrzeugen und Umwelteinflüssen entscheidet sich der Fahrer für Manöver, die er durch noch bediente Steuereinrichtungen (z. B. Lenkrad) an das Fahrzeug weitergibt.

### 4.5.1 3-Ebenen-Modell zur Fahrerintentionserkennung

Die Abstraktion des Modells aus Abbildung 4.9b führt zu einem 3-Ebenen-Modell für Fahrsituationen (Schroven und Giebel 2008). Die Kategorien *Fremdfahrzeuge* und *Umwelt* stellen eine gemeinsame Klasse von beeinflussenden Faktoren für den Fahrer und das nächste Fahrmanöver dar. Es sind externe Reize, die den Fahrer zu einem Manöver verleiten können oder es begünstigen. Diese begünstigenden Einflussfaktoren werden als *Motivatoren* bezeichnet.

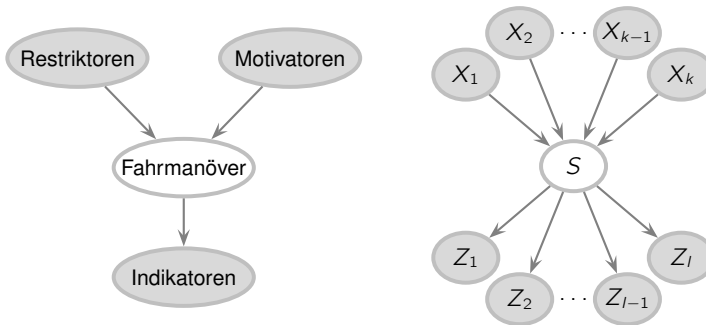


Abbildung 4.10: 3-Ebenen-Modell zur Fahrerintentionserkennung (links) und die resultierende Struktur des Bayes'schen Netzes (rechts), temporale Kanten sind nicht dargestellt

net. Auf der anderen Seite können äußere Randbedingungen ein Fahrmanöver erschweren, es verbieten oder gar unmöglich machen. Derartige Einflüsse werden als *Restriktoren* definiert. Ein solches Motivkonzept bildet die Grundlage zielgerichteten Handelns (Werther 2006). Jedes Fahrmanöver, das der Fahrer nach Beurteilung der Motivatoren und Restriktoren durchführt, hat eine Reihe von Konsequenzen. Sie werden als *Indikatoren* bezeichnet. Diese Struktur sorgt für Kausalzusammenhänge zwischen den einzelnen Ebenen. Abbildung 4.10 zeigt das 3-Ebenen-Modell und die daraus resultierende Struktur für ein Inferenznetz. Ein vielfach als Nachteil angesehener Aspekt Bayes'scher Netze, die Notwendigkeit zur Angabe von A-priori-Wahrscheinlichkeiten, entfällt bei dieser Struktur praktisch, da die Elternknoten des zentralen Manöverknotens  $S$  vollständig observiert werden. Besonders bei den Zuständen von  $S$  ist zu beachten, dass eine Vollständigkeit des Zustandsraum stets durch eine so genannte *Leak-Variable* erreicht werden kann, die aus der Negation der Disjunktion der anderen Zustände besteht (Murphy 2002b).

Die Ebene der Motivatoren und Restriktoren beinhaltet mit den jeweiligen Übergangswahrscheinlichkeiten zum Manöverknoten das angenommene Verhalten des Fahrers. Hier kann beispielsweise modelliert werden, ob ein Fahrer ein Abbiegemanöver durchführen würde, obwohl das Abbiegen an der entsprechenden Kreuzung oder Einmündung untersagt ist. Die Wahrscheinlichkeit für solch ein regelwidriges Verhalten ist eindeutig höher, wenn der Fahrer durch dieses Verhalten eine Kollision mit einem Vorderfahrzeug vermeiden könnte. An diesem Beispiel wird bereits deutlich, dass eine Manövererken-

nung für Normalfahrt von einer für *vom Fahrer wahrgenommene* Gefahrensituationen unterschieden werden bzw. explizit in der Modellierung berücksichtigt werden muss.

Ebenso muss bei der Gestaltung einer Fahrerintentionserkennung die Applikation, welche von einer solchen Erkennung profitieren soll, berücksichtigt werden. Das heißt, der Kontext einer solchen Erkennung muss definiert sein. Als Informationsquellen können dabei zur Verfügung stehen:

**Fahrer** Viele Informationen über den Fahrer resultieren aus indirekten Messungen. Dazu zählen die Bestimmung des eingestellten Lenkradwinkels, der Pedalstellungen oder der Position des Gangwahlhebels. Möglichkeiten zur direkten Fahrerbeobachtung (z. B. Detektion der Kopfposition) ergeben sich durch die Verwendung von Videosensorik.

**Fahrzeug** Für den Zustand des Fahrzeugs sind heute in Serienfahrzeugen bereits eine Reihe von Sensoren vorhanden, deren Messwerte von den entsprechenden Steuergeräten auf einem Fahrzeugbus veröffentlicht werden. Dazu zählen beispielsweise die aktuelle Geschwindigkeit oder der eingestellte Lenkradwinkel.

**Umfeld** Mittels geeigneter Sensoren lassen sich Daten über das Umfeld, d. h. andere Verkehrsteilnehmer, die Infrastruktur (z. B. Fahrstreifenmarkierungen oder Entfernung zur nächsten Kreuzung) oder die Wetterverhältnisse (z. B. Regen) gewinnen.

Wird die Intentionserkennung wie in dieser Arbeit zur Manipulation eines ACC-Systems verwendet, ist folgendes zu berücksichtigen: Eine Berücksichtigung der Fahr- bzw. Bremspedalstellung und -betätigung ist selten aufschlussreich, da diese Bedieneinrichtungen während der geregelten Fahrt nicht vom Fahrer betätigt werden. Hier wird zur Intentionserkennung unter anderem das Querführungsverhalten des Fahrers ausgewertet. Dieses Verhalten kann unter Einwirkung eines Spurhalteassistentensystems von dem bei deaktivierter Querführungsunterstützung abweichen. Das bedeutet, dass Assistenzsysteme Kenntnis voneinander haben müssen. Diese Notwendigkeit scheint vor dem Hintergrund steigender Integration jedoch ein überwindbares Hindernis zu sein (Schöning u. a. 2004).

### 4.5.2 Frühzeitige Erkennung von Fahrstreifenwechseln

Mögliche Manöver bei der geregelten Fahrt mit einem ACC-System lassen sich in longitudinale und laterale Manöver aufteilen. Longitudinale Manöver,

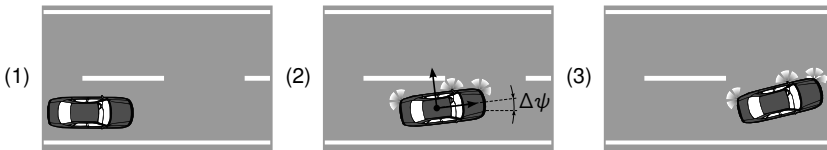


Abbildung 4.11: Drei Zustände eines Fahrstreifenwechsels, kein Fahrstreifenwechsel (Phase 1), Vorbereitung (Phase 2), Durchführung (Phase 3)

z. B. Freifahrt oder stationäre Folgefahrt, sind anhand der Präsenz eines Vorderfahrzeugs gut voneinander zu unterscheiden. Vielmehr stellen laterale Manöver, sowohl des eigenen Fahrzeugs als auch von anderen Verkehrsteilnehmern, die zentralen Übergänge für ein ACC-System dar, die das Regelungsverhalten fundamental beeinflussen. In dieser Arbeit wird der Fokus auf Manöver des eigenen Fahrzeugs gelegt. Wenn man die Betrachtungen auf das Haupteinsatzgebiet von ACC-Systemen, d. h. Autobahnen, beschränkt, sind die möglichen lateralen Manöver: Auffahren, Fahrstreifenwechsel nach links bzw. rechts, Abfahren. Da Auf- und Abfahrtsituationen naturgemäß seltener auftreten, wird im Folgenden eine Situationsanalyse zur frühzeitigen Erkennung von Fahrstreifenwechsel nach links<sup>12</sup> bei Fahrt auf gut strukturierten Straßen mit baulich getrennten Richtungsfahrbahnen entwickelt. Dabei werden Fahrstreifenwechsel betrachtet, die zum Überholen eines Vorderfahrzeugs durchgeführt werden und eine gesteigerte Dynamikerwartung des Fahrers aufweisen. Zur besseren Analyse des Manövers wird es in drei Phasen eingeteilt (siehe Abbildung 4.11). Phase 1 stellt die Fahrt ohne Fahrstreifenwechselabsicht dar. In Phase 2 (Vorbereitung) wird der Fahrstreifenwechsel z. B. durch Annäherung an die Fahrstreifenmarkierung vorbereitet und Phase 3 (Durchführung) stellt die letzte Phase des Manövers dar.

Dazu müssen geeignete Zufallsvariablen ermittelt werden, die Motivatoren, Restriktoren bzw. Indikatoren des Manövers sind. [Kopf \(2005\)](#) zeigt eine Reihe von Messgrößen, für die allgemein eine hohe Korrelation zur Fahrerabsicht vorliegt. Dazu zählen

- Fahr-/Bedienverhalten (z. B. Lenkung, Beschleunigung),
- Umgebungsinformationen (z. B. Objekte, Straßentyp, Fahrstreifen),
- Blickbewegung, Blickrichtung,

<sup>12</sup>Die richtungsindividuelle Betrachtung von Fahrstreifenwechseln ist aufgrund der Verkehrsregeln

- Kopfposition, Kopfausrichtung, Kopfbewegung.

Die ersten beiden Kategorien stehen im Rahmen dieser Arbeit im Fokus. Zu den Motivatoren und Restriktoren eines Fahrstreifenwechsels gelangt man durch folgende Fragestellungen:

- Wird der Fahrer durch ein langsames Fahrzeug in seiner Fahrt gestört?
- Ist ein weiterer Fahrstreifen links verfügbar?
- Ist das Fahren auf dem Fahrstreifen links attraktiv?
- Ist ein Fahrstreifenwechsel nach links erlaubt?
- Wird das Manöver durch andere Verkehrsteilnehmer verhindert?
- Werden Verkehrsteilnehmer durch den Fahrstreifenwechsel behindert?

Aus diesen Fragen lassen sich die Zufallsvariablen der Eltern-Ebene des Zustandsknotens ableiten. Nach Rösler (2008) werden etwa 65 % der Fahrstreifenwechsel nach links bei Störung durch ein langsames Vorderfahrzeug durchgeführt. Das Vorliegen einer solchen Störung wird dann angenommen, wenn die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers oberhalb der eines vorausfahrenden Fahrzeugs liegt.<sup>13</sup> Eine notwendige Bedingung für einen Fahrstreifenwechsel nach links ist, dass dort ein weiterer Fahrstreifen zur Verfügung steht. Diese Randbedingung ist im Gegensatz zu vielen anderen nicht mit Unsicherheit behaftet. Für die Abwesenheit eines weiteren Fahrstreifens lässt sich demnach die Regel formulieren:

*keinFahrstreifenVorhanden  $\Rightarrow$  keinFahrstreifenwechsel*

Solche Regeln lassen sich durch entsprechende Wahl der Übergangswahrscheinlichkeiten ebenfalls in ein Bayes'sches Netz integrieren und müssen nicht auf andere Art und Weise behandelt werden.

Für einen Fahrstreifenwechsel ist desweiteren relevant, ob das Befahren des Zielfahrstreifens attraktiv ist. Die Attraktivität eines Fahrstreifens wird hier anhand der Differenz der mittleren Geschwindigkeit des eigenen und der des Zielfahrstreifens bewertet. Ist es nicht möglich, im benachbarten Fahrstreifen schneller zu fahren, sinkt die Wahrscheinlichkeit für einen Wechsel. Ebenso

---

in Deutschland sinnvoll, kann jedoch z. B. in den USA aufgrund des fehlenden Rechts-Überholverbots hinfällig werden.

<sup>13</sup>Hier wird abermals deutlich, warum der Kontext einer Intentionserkennung bei der Gestaltung berücksichtigt werden sollte: Das Fahrerassistenzsystem (ACC) bietet durch eine Bedieneinrichtung (z. B. Bedienelement, siehe Abbildung 3.2) eine weitere Fahrereingabemöglichkeit. Damit liegt die ansonsten nur schwer zu ermittelnde Wunschgeschwindigkeit des Fahrers als vorgegebene Geschwindigkeit des ACC-Systems vor.



wird ein Fahrstreifenwechsel unwahrscheinlicher, wenn er nicht erlaubt ist. Ein solches Verbot kann z. B. durch eine durchgezogene Fahrstreifenmarkierung oder ein entsprechendes Verkehrszeichen angezeigt sein.

Andere Verkehrsteilnehmer beeinflussen maßgeblich die Wahrscheinlichkeit für die Durchführung von Fahrmanövern. Ein Fahrer wird z. B. davon absehen, einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen, wenn sich neben ihm ein anderes Fahrzeug befindet. Ebenso wird ein im Nachbarfahrstreifen nur knapp vor ihm fahrendes Fahrzeug, die Wahrscheinlichkeit für ein Wechselmanöver sinken lassen – insbesondere, wenn es keine signifikant höhere Geschwindigkeit besitzt. Schließlich wirkt sich der rückwärtige Verkehr auf die Wahrscheinlichkeit eines Fahrstreifenwechsels aus. Wenn sich im linken Nachbarfahrstreifen ein Fahrzeug mit hoher Relativgeschwindigkeit nähert, sodass dieses bei einem Fahrstreifenwechsel des betrachteten Fahrzeugs verzögern müsste, sinkt die Wahrscheinlichkeit für das Manöver. Eine Möglichkeit der Auswertung ist die Betrachtung der Zeitlücke zwischen dem herannahenden und dem eigenen Fahrzeug. Ähnliche Überlegungen können für ein rückwärtiges im eigenen Fahrstreifen fahrendes Fahrzeug angestellt werden, wenn dieses eine hohe positive Relativgeschwindigkeit aufweist. Entgegenkommende Fahrzeuge werden hier wegen der Beschränkung auf autobahnähnliche Verkehrsumgebung vernachlässigt. Ihr Einfluss auf die Fahrstreifenwechsellmotivation sollte bei der Betrachtung anderer Straßentypen, z. B. Landstraßen, jedoch berücksichtigt werden.

Bezüglich der Indikatoren lässt sich feststellen, dass alle Größen, die den dynamischen Zustand des Fahrzeugs beschreiben, bezogen auf den eigenen Fahrstreifen betrachtet werden müssen, da das Manöver des Fahrstreifenwechsels erst durch den Fahrstreifen mit seinen Markierungen als Grenzen definiert wird. Deshalb sind Größen wie der Lenkradwinkel oder die Gierwinkelgeschwindigkeit nicht ohne weiteres geeignet.<sup>14</sup> Im Gegensatz dazu ist die laterale Abweichung  $\Delta y$  des Fahrzeugs von der Fahrstreifenmitte ein direkter Indikator für einen Fahrstreifenwechsel. Bei der Untersuchung aufeinander folgender Werte findet man bei einer räumlichen Betrachtung, d. h.  $\Delta y = f(x)$ , eine zusätzliche Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit, die keine allgemeinen Aussagen zulässt. Wird die laterale Ablage als Funktion der Zeit, d. h.  $\Delta y = f(t)$ , untersucht, so ergeben sich gute Übereinstimmungen für einen großen Geschwindigkeitsbereich. Abbildung 4.12 zeigt Ergeb-

<sup>14</sup>Wenn der Lenkradwinkel jedoch auf den Fahrstreifenverlauf bezogen wird, sind zusätzliche Informationen denkbar, da der Lenkradwinkelverlauf der Fahrzeugbewegung zeitlich vorausseilt. Diese Phasenverschiebung nimmt jedoch mit sinkender Lenkradwinkelgeschwindigkeit ab. Komfortabel durchgeführte Fahrstreifenwechseln weisen üblicherweise geringe Lenkradwinkelgeschwindigkeiten auf.

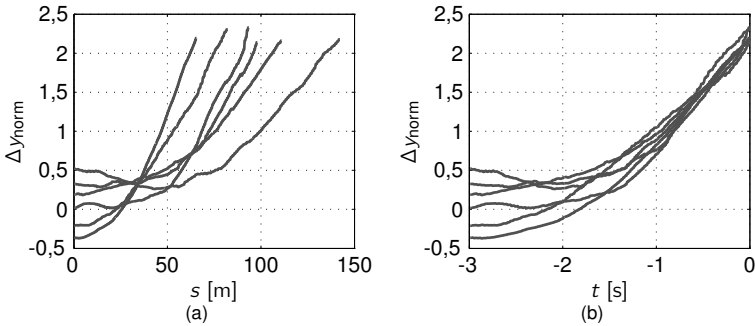


Abbildung 4.12: Auf die Fahrstreifenbreite normierte Ablage bei Fahrstreifenwechseln mit Geschwindigkeiten von 80 bis 170 km/h als Funktion der zurückgelegten Strecke (a) bzw. der Zeit bis zum Fahrstreifenwechsel (b)

nisse aus Messfahrten in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 80 km/h und 170 km/h. Die laterale Ablage ist dabei normiert, sodass ein Wert von 1 dem Berühren der linken Fahrstreifenmarkierung mit der äußeren Kante des Fahrzeugs entspricht.

Eine weitere intuitiv zugängliche Größe, die sich bei einem Fahrstreifenwechsel verändert, ist der Gierwinkelfehler  $\Delta\psi$ . Damit wird der Winkel zwischen der Fahrzeuglängsachse und der Fahrstreifentangente bezeichnet. Die Richtungsänderung des Fahrzeugs ist bei normaler Fahrt notwendig, damit ein Querversatz entstehen kann.

Die Straßenverkehrsordnung<sup>15</sup> (StVO) sorgt in Deutschland für einen weiteren Indikator. Nach § 7 StVO ist „*jeder Fahrstreifenwechsel (...) rechtzeitig und deutlich anzukündigen; dabei sind die Fahrtrichtungsanzeiger zu benutzen*“. Trotz der eindeutigen Rechtsverordnung findet man in der Praxis recht unterschiedlichen Umgang mit dem Fahrtrichtungsanzeiger (siehe Abschnitt 2.4).

Berücksichtigt man außerdem durch temporale Kanten, dass keine beliebigen Zustandswechsel innerhalb des Manöverknotens  $S$  möglich sind, gelangt man zu einem Bayes'schen Netz, das in Abbildung 4.13 dargestellt ist. Dabei stehen die Zufallsvariablen für folgende Größen:

<sup>15</sup>StVO vom 16. November 1970 (Bundesgesetzblatt, Teil I, S. 1565), zuletzt geändert mit Verordnung vom 28. November 2007 (Bundesgesetzblatt, Teil I, S. 2774).

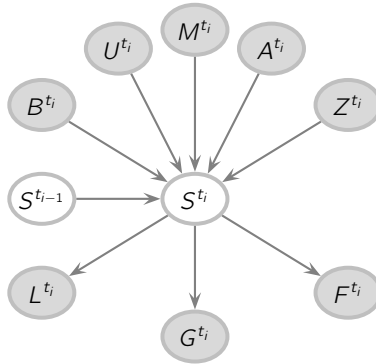


Abbildung 4.13: Dynamisches Bayes'sches Netz zur Erkennung von Fahrstreifenwechseln

- $B$  Behinderung rückwärtiger Verkehrsteilnehmer
- $U$  Unzufriedenheit im eigenen Fahrstreifen
- $M$  Möglichkeit zum Fahrstreifenwechsel (Existenz und Verfügbarkeit des Zielfahrstreifens)
- $A$  Attraktivität des Zielfahrstreifens
- $Z$  Zulässigkeit eines Fahrstreifenwechsels
- $L$  Laterale Ablage innerhalb des Fahrstreifens
- $G$  Gierwinkelfehler innerhalb des Fahrstreifens
- $F$  Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers

Die Knoten  $B$ ,  $U$ ,  $M$ ,  $A$  sowie  $Z$  spiegeln die objektiven Aspekte der Fahrsituation wider. Sie berücksichtigen die Möglichkeit sowie eventuell vorhandene Verbote für einen Fahrstreifenwechsel. Man kann diese Ebene als *notwendig* aber nicht *hinreichend* für ein Manöver verstehen. Auch wenn sie z. B. durch Modellierung des Verhaltens auf langsamere Vorderfahrzeuge den Fahrer selbst abbilden, so bleiben aktuelle Fahrerhandlungen unberücksichtigt. Eine solche Struktur könnte deshalb bei der Entscheidung für oder gegen Manöver in automatisch fahrenden Fahrzeugen geeignet sein. Für den Bereich der Fahrerassistenzsysteme fehlt die zentrale Komponente – der Fahrer. Dieser wird im Wesentlichen durch die Knoten  $L$ ,  $G$  und  $F$  dargestellt. Nur das Verhalten des Fahrers entscheidet abschließend darüber, ob ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt wird. Auch wenn die objektiven Bedingungen günstig

erscheinen, ermöglicht die fahrerhandlungsbezogene Ebene Fehldetektionen zu reduzieren, die durch die Modellierung der objektiven Ebene allein nicht zu vermeiden sind.

Das hier vorgestellte Modell zur Situationsanalyse im Hinblick auf das nächste Fahrmanövers des Fahrers ist flexibel hinsichtlich der Erweiterbarkeit bei weiteren Datenquellen. Sie lassen sich als zusätzliche Knoten innerhalb des Bayes'schen Netz integrieren. Bei günstiger Struktur, d. h. ein neues Merkmal stellt einen Indikator dar, können alle Parameter des bestehenden Netzes weiterhin verwendet werden. Die Struktur ist grundsätzlich auch auf anderer Fahrerassistenzsysteme anwendbar. Wenn die Annahme der Rückwirkungsfreiheit nicht mehr erfüllt ist, muss das Modell um den Aspekt der wechselseitigen Beeinflussung erweitert werden.

## Kapitel 5

# Entwicklung einer situationsadaptiven automatisierten Längsführung

Walking on water and developing software from a specification are easy if both are frozen.

---

*(Edward V. Berard)*

In diesem Kapitel wird das Vorgehen zur Entwicklung neuer Fahrerassistenzsysteme aus Kapitel 3 und die Techniken aus Kapitel 4 wieder aufgegriffen, um die konkrete Umsetzung im Rahmen dieser Arbeit zu beschreiben.

Abschnitt 5.1 beschreibt wesentliche Anforderungen, die an das System zur Situationsanalyse gestellt werden. In Abschnitt 5.2 wird detailliert auf den Systementwurf eingegangen. Dabei wird zunächst die logische Sicht auf das System beschrieben. Da das Assistenzsystem in ein Experimentalfahrzeug integriert wird, folgt ein umfangreicher Einblick in den physikalischen Aufbau und die Vernetzung des Gesamtsystems.

Abschnitt 5.3 geht auf die Implementierung verschiedener Komponenten des Softwaresystems ein. Einerseits wird das auf Längsregelmodell eingegangen, das aufgrund der implementierten Schnittstellen eine flexible Nutzung für unterschiedliche Zwecke ermöglicht. Andererseits wird die entwickelte Bibliothek zur Modellierung und Inferenzbildung in Bayes'schen Netze vorgestellt.

Für das wiederholbare Ausführen von Unit-Tests und eine geeignete Dokumentation wird in Abschnitt 5.4 eine Modultest-Software um den Aspekt der Automatisierung und Erstellung von hierarchischen Berichten erweitert.

### 5.1 Analyse

Ausgangspunkt für die Entwicklung einer situationsadaptiven automatisierten Längsregelung ist das in Abschnitt 1.1 erwähnte Verbesserungspotential kon-

ventioneller Längsführungssysteme. Damit handelt es sich also um die Weiterentwicklung eines bestehenden Fahrerassistenzsystems, wobei die entwickelten Modelle zur maschinellen Analyse der Fahrsituation (Abschnitt 4.5) nicht auf Längsführungssysteme beschränkt sein sollen. Für die Interpretation der Verkehrssituation sind Umfeldsensoren erforderlich. Neben dem für eine Längsregelung relevanten Vorderfahrzeug, das mit Hilfe der serienmäßigen ACC-Sensorik (Radarsensor) erfasst werden kann, müssen Objekte in Nachbarfahrstreifen detektiert werden. Außerdem sind Fahrstreifeninformationen, d. h. Position und Ausrichtung des eigenen Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens sowie Markierungsarten, erforderlich.

Eine zentrale Aufgabe beim Entwurf des Gesamtsystems ist die Untersuchung von verschiedenen Verfahren zur Verarbeitung der Sensordaten und Fahrereingaben (siehe Kapitel 4). Die Anforderungen an die Methode eines solchen Inferenzsystems wurden dort ausführlich diskutiert. Das daraus entstandene Modul zur Erkennung von Fahrstreifenwechseln soll eine möglichst geringe Anzahl an Fehldetektionen aufweisen. Dabei steht die Vermeidung von Detektionsfehlern 1. Art (falsch positiv) gegenüber Fehlern 2. Art (falsch negativ) im Vordergrund. Die von gewöhnlichen Längsführungssystemen bekannten Anforderungen, z. B. dass der Fahrer das Assistenzsystem jederzeit überstimmen und deaktivieren kann, müssen hier ebenfalls erfüllt werden.

Der adressierte Anwendungsfall des Assistenzsystems ist ein Fahrstreifenwechsel auf Autobahnen mit mehreren Fahrstreifen für eine Richtungsfahrbahn. Dabei werden die drei Szenarien Fahrstreifenwechsel nach stationärer Folgefahrt sowie Annäherung an ein langsames Vorderfahrzeug mit und ohne Fahrstreifenwechsel unterschieden. Auch wenn eine kontinuierliche Adaption des Fahrerassistenzsystems, z. B. abhängig von der erkannten Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden soll, möglich ist, soll das Assistenzsystem bezüglich der Anpassung nur die beiden Zustände *Fahrstreifenwechsel* und *Kein Fahrstreifenwechsel* unterscheiden. Ab einer konfigurierbaren Detektionsschwelle soll die Modifikation des Assistenzsystems aktiviert werden. Die entwickelten Algorithmen sollten sich möglichst auf vorhandener Rechenhardware implementieren lassen, da für die regelungstechnische Aufgabe der Abstandsregelung (siehe Abschnitt 2.5) bereits eine Implementierung vorliegt. Für die Ansteuerung der Aktorik, d. h. hier Beschleunigen und Verzögern des Fahrzeugs, sollen möglichst serienmäßige Schnittstellen verwendet werden.

## 5.2 Entwurf

Der Entwurf soll wie in Abschnitt 3.3 beschrieben in eine logische und eine physikalische Sicht unterteilt werden. Dabei wird zunächst auf die Struktur des Gesamtsystems und dann auf die logische Integration der Situationsanalyse in das Längsführungssystem eingegangen. Im Anschluss folgt eine Beschreibung des physikalischen Aufbaus des Experimentalfahrzeugs mit einem Vernetzungsplan, der die Kommunikation im Fahrzeug darstellt.

### 5.2.1 Logische Sicht

Der Gesamtaufbau des Assistenzsystems ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die serienmäßigen Fahrzeugsensoren (z. B. impulsgebende Raddrehzahlsensoren) sowie zusätzliche Umfellsensoren stellen die Eingangsdaten des Assistenzsystems dar. Die Daten werden in einer Sensordatenfusion verarbeitet. Dort werden die bereits in einem Tracking der Einzelsensoren vorverarbeiteten Daten zu einer gemeinsamen Objektliste zusammengeführt. Dabei wird das für die ACC-Regelung relevante Objekt besonders markiert (Zielauswahl). Außerdem werden weitere Informationen über das Umfeld (z. B. Fahrstreifenmarkierungen) über eine generische Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Diese Daten werden dem Längsführungsmodul zugeführt, das die Situationsanalyse enthält. Da das Regelsystem wesentlichen Einfluss auf die Fahrzeugbewegung nehmen kann, müssen die Ausgabegrößen der Längsführung, d. h. Beschleunigungsanforderungen  $a_{\text{sol}}$ , an eine Überwachungsinstanz weitergeleitet werden. Diese überwacht die Anforderungen hinsichtlich ihres Zeitverhaltens (zyklisches Senden), der Anforderungshöhe ( $a_{\text{min}} <$

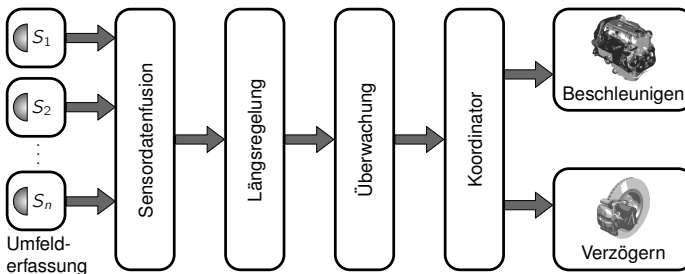


Abbildung 5.1: Grobstruktur des gesamten Längsführungssystems

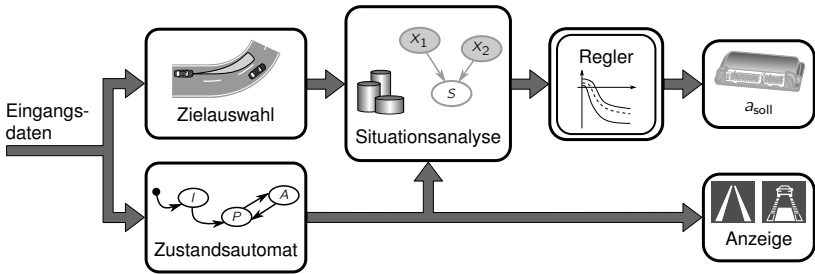


Abbildung 5.2: Struktur der Längsregelung mit Ausgabegrößen zur Aktorikeinflussung und Fahreranzeige

$a_{\text{soll}} < a_{\text{max}}$ ) sowie der Botschaftszähler und Prüfsumme. Bei korrekten Anforderungen entscheidet ein Koordinator, wie die Beschleunigungsanforderung umgesetzt werden kann.

Abbildung 5.2 zeigt wie die Situationsanalyse in die Längsregelung eingebettet (siehe Abbildung 5.1) ist und diese erweitert (vgl. Abbildung 2.6). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Auswahl des relevanten Regelobjekts nicht von der Situationsanalyse beeinflusst. Abhängig von der erkannten Fahrsituation wird das Verhalten des Längsreglers angepasst.

## 5.2.2 Physikalische Sicht

Für Fahrversuche stand ein Experimentalfahrzeug (Volkswagen Passat) zur Verfügung. Als Umfeldsensorik wird einerseits der 77 GHz-Fernbereichsradarsensor eines ACC-Systems verwendet. Der Sensor zeichnet sich durch eine hohe Reichweite von 200 m aus. Die vom Sensor detektierten Objekte tragen die Zustandsgrößen *Entfernung*, *Relativgeschwindigkeit* sowie *laterale Relativposition* (in Form eines Winkels). Als weiterer Umfeldsensor kommt ein Stereo-Kamerasystem zum Einsatz. Dieses liefert ebenfalls Informationen über die relative Lage und Geschwindigkeit von Objekten. Darüber hinaus kann die Breite und Höhe von Objekten bestimmt werden und unter geeigneter Perspektive auch deren Länge. Das Kamerasystem kann darüber hinaus Informationen über den weiteren Verlauf eines Fahrstreifens anhand von erkannten Markierungen ermitteln. Außerdem stellt es die relative Position (lateraler Versatz) und Ausrichtung (Gierwinkelfehler) des Fahrzeugs innerhalb des befahrenen Fahrstreifens zur Verfügung. Abbildung 5.3 zeigt die Senso-





Abbildung 5.3: Experimentalfahrzeug mit Umfeldsensorik: Stereo-Kamera-system (oben) und Fernbereichsradarsensor (unten)

ren sowie ihre Einbaupositionen im Fahrzeug.

Durch die Verwendung eines Serienfahrzeugs ergeben sich verschiedene Randbedingungen bezüglich des physikalischen Entwurfs, da z. B. vorhandene Bussysteme zwar in Grenzen manipuliert werden können, elementare Aktorikschnittstellen (Beschleunigen, Bremsen) jedoch nur mit erheblichem Aufwand modifiziert werden können. Die Beeinflussung der Längsdynamik des Experimentalfahrzeugs kann durch Erhöhung des Kraftstoffmassenstroms erreicht werden. Eine Verzögerung wird zum einen durch das Motorschleppmoment und zum anderen die Fahrwiderstände hervorgerufen. Bei Fahrt in der Ebene bestehen diese im Wesentlichen aus der Rollreibung und insbesondere dem Luftwiderstand. Für stärkere Verzögerungen kann die Bremsanlage des Fahrzeugs angesteuert werden. Je nach Betriebszustand des Fahrzeugs (z. B. Geschwindigkeit, Motordrehzahl) kann für eine gewisse Sollverzögerung allein die Reduktion des Antriebsmoments ausreichend sein bzw. eine aktive Bremsung erforderlich werden. Das verwendete Experimentalfahrzeug verfügt für diese Koordination über eine im Motorsteuergerät implementierte Beschleunigungsschnittstelle. Deren Eingangsgröße ist eine Sollbeschleunigung, die von einem unterlagerten Beschleunigungsregler umgesetzt wird.

Abbildung 5.4 zeigt detailliert den Aufbau des Experimentalfahrzeugs. Neben dem gewöhnlichen Fahrzeugbus des Antriebsstrangs werden drei weitere CAN-Busse verwendet. Die Umfeldsensoren, d. h. Radarsensor ( $S_R$ ) und Stereokamerasystem ( $S_K$ ), sind auf einem Sensorik-Bus zusammengefasst. Der Radarsensor stellt seine Objekte direkt über eine CAN-Schnittstelle als Objektliste zur Verfügung. Da es sich um einen serienmäßigen Radarsensor handelt, an dem lediglich die Schnittstelle zur Bereitstellung der detek-

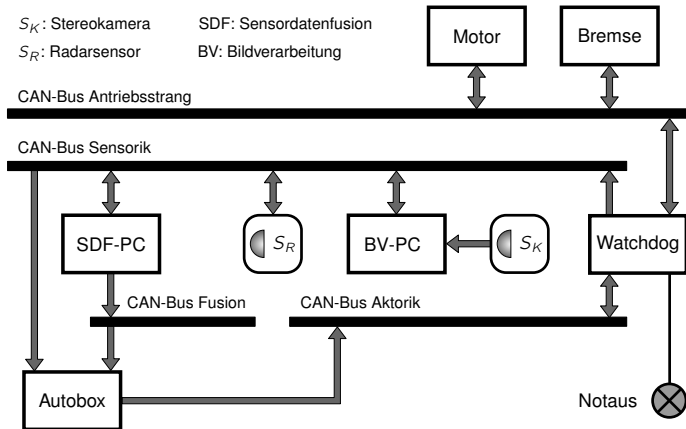


Abbildung 5.4: Physikalische Sicht des Gesamtsystems mit getrennten Bussystemen und zentralem Watchdog zur Überwachung

tierten Objekte aktiviert ist, kann dieser Sensor nicht mehr gemeinsam mit dem Motor- oder Bremsensteuergerät auf einem CAN-Bus verwendet werden. Da er weiterhin Ansteuerbotschaften für die Aktorik sendet, würden sich diese mit den selbst generierten Botschaften stören und zu Fehlern führen. Das Stereokamerasystem besteht aus den beiden Kameras sowie einem PC, welcher die Bildverarbeitung durchführt. Dazu gehört die Objektbildung und ein Tracking. Die Objekte werden ebenfalls per CAN an das Modul Sensordatenfusion (SDF) übertragen. Die Sensordatenfusion erstellt ein Umfeldmodell aus Objekten und Fahrstreifeninformationen und übermittelt es auf dem Fusions-CAN an das Funktionssteuergerät, hier eine dSpace Autobox. Dabei handelt es sich um ein auf der PowerPC-Prozessorarchitektur basierendes Rapid-Prototyping-System, das neben analogen und digitalen Ein- und Ausgängen auch gängige Fahrzeugschnittstellen wie CAN unterstützt ([dSPACE 2009](#)). Dies erleichtert die Systemintegration in Experimentalfahrzeugen. Auf diesem Prototyping-System sind die Längsführung sowie die Situationsanalyse implementiert. Die Beschleunigungsanforderungen werden anschließend auf dem Aktorik-CAN an den Watchdog gesendet. Es handelt sich dabei um einen CANlog 3, eine frei programmierbare Hardware mit 4 CAN-Kanälen sowie digitalen und analogen Ein-/Ausgängen ([G.I.N. 2010](#)). Zum einen findet hier die Überwachung der Ansteuerbotschaften statt, andererseits werden für das Objekttracking benötigte Informationen (z. B. Geschwindigkeit) oder Fahreingaben (Bedienung des ACC-Hebels) auf den Sensorik-CAN weiterge-

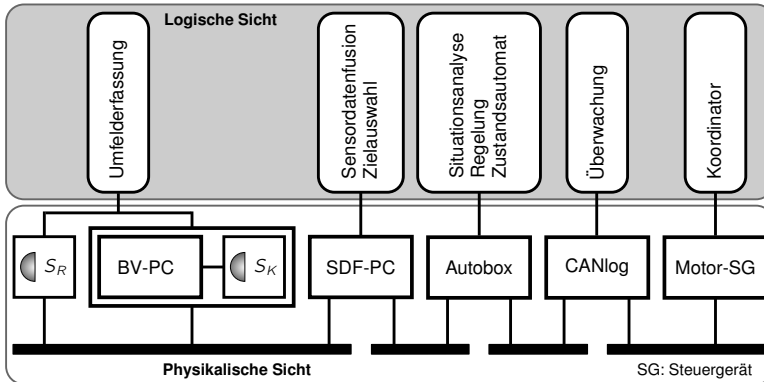


Abbildung 5.5: Abbildung von Funktionen (logische Sicht) auf Komponenten (physikalische Sicht)

leitet. Da der Watchdog die Schnittstelle der Versuchssteuergeräte zum Fahrzeug und damit den Aktoren darstellt, wird hier ein Notausschalter vorgesehen. Dieser trennt die Spannungsversorgung des Watchdog und unterbindet mit sofortiger Wirkung jeglichen Aktorikeingriff, da Ansteuerbotschaften nicht mehr auf den CAN-Bus des Antriebsstrangs weitergeleitet werden. Abbildung 5.5 fasst die Beziehungen der Funktionen aus der logischen Sicht und ihre Verteilung auf einzelne Komponenten im Fahrzeug (physikalische Sicht) zusammen.

## 5.3 Implementierung

Für die Implementierung einer situationsadaptiven automatisierten Längsführung kam im Rahmen dieser Arbeit das Modellierungswerkzeug Simulink zum Einsatz (Mathworks 2009). Bei Simulink-Modellen handelt es sich um ausführbare Funktionsmodelle, mit denen das modellierte System in einer Simulation für verschiedene Stimuli untersucht werden kann. Andererseits kann aus dem Modell mit Hilfe eines Codegenerators C-Code für verschiedene Plattformen erzeugt werden. Die Modellierung in Simulink ist stark datenflussorientiert: Blöcke (Subsysteme) repräsentieren dabei Transformationen und die Verbindungen dazwischen Datenflüsse. Das Modell ist damit ein gerichteter Graph und stellt eine Umsetzung des Architekturmusters Pipes & Filter dar. Diese Struktur entspricht dem Aufbau vieler eingebetteter Systeme

in einem Kraftfahrzeug – insbesondere dem von Fahrerassistenzsystemen: Eine Menge von Eingangsgrößen wird eingelesen und verarbeitet, um daraus eine oder mehrere Ausgangsgrößen zu erzeugen. Die Ausgangsgrößen beeinflussen im Fall von eingreifenden Fahrerassistenzsystemen häufig die Eingangsgrößen, sodass ein Regelkreis entsteht.

### **5.3.1 Multifunktionales Längsregelmodell**

Bei geeigneter Konfiguration des Entwicklungsmodells kann es gleichermaßen für Simulationen und Codegenerierung verwendet werden und stellt damit das zentrale Artefakt der Entwicklung dar. Abbildung 5.6 zeigt die dafür realisierte Struktur mit einem Schwerpunkt auf den Schnittstellen für unterschiedliche Anwendungsfälle. In der Eingabeschicht wird durch die Komponente *DataInputManager* eine Abstraktion von den verschiedenen Eingangsquellen erreicht. Auf diese Weise können Daten aus dem Fahrzeug (siehe auch Abbildung 5.4) wie auch aus aufgezeichneten Messdaten (*FileInput*) oder einer integrierten Simulation (*EgoSimulation*, *ObjectSimulation*) verwendet werden. Dabei sind auch Kombinationen möglich, sodass beispielsweise im Experimentalfahrzeug reale Daten des eigenen Fahrzeugs mit simulierten Objekten genutzt werden können. Für die Ausgangsschicht verwaltet die Komponente *DataOutputManager* die unterschiedlichen Ausgangskanäle. Dabei sind die Ansteuerung von Fahrzeugaktoren, das Abspeichern in Dateien und eine direkte Visualisierung möglich. Eine Beschreibung der Schnittstellen für die ACC-Komponente findet sich in Anhang B.

Für die Simulation des Modells können zwei Varianten unterschieden werden, die im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kommen. In Open-Loop-Simulation werden dem Modell aufgezeichnete Messdaten zugeführt und der Modellausgang wird analysiert. Dabei haben die Ausgaben (z. B. Sollbeschleunigung des Längsreglers) keinen Einfluss auf den aktuellen Systemzustand (z. B. Geschwindigkeit). Die Simulationsgeschwindigkeit ist dabei abhängig von der Modellkomplexität und der Zykluszeit des Systems. Prinzipiell wird die Simulation so schnell wie möglich durchgeführt. Für eine interaktive Simulation (Closed-Loop-Simulation) wurde ein Einspurmodell (Mitschke und Wallentowitz 2004) zur Abbildung des dynamischen Fahrzeugverhaltens implementiert. Zur Eingabe der Stellgrößen (z. B. Lenkradwinkel) wird dabei eine Softwareschnittstelle (*ControlDesk*) verwendet, welche auch beim Betrieb im Realfahrzeug für Parameteränderung zur Laufzeit und Datenvisualisierung verwendet wird (dSPACE 2009). Die Simulation läuft dabei in Echtzeit ab.

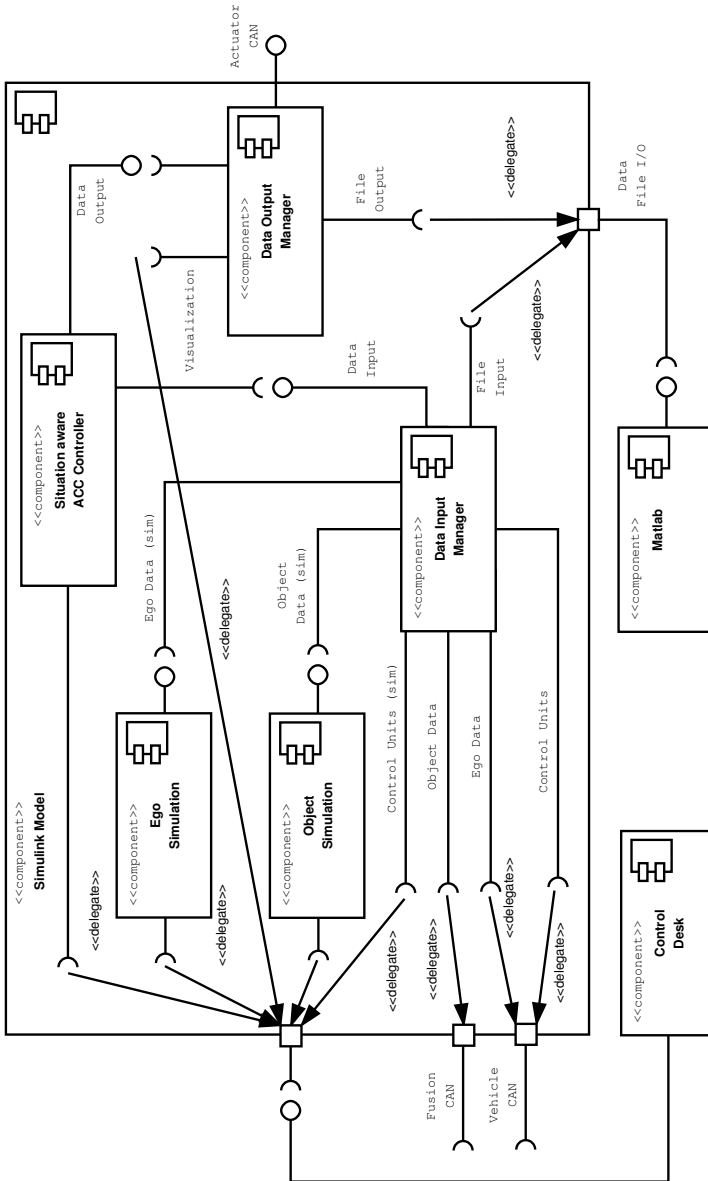


Abbildung 5.6: Struktur des erzeugten Softwaremodells mit variablen Ein- und Ausgängen zum Einsatz im Fahrzeug und in Simulationen

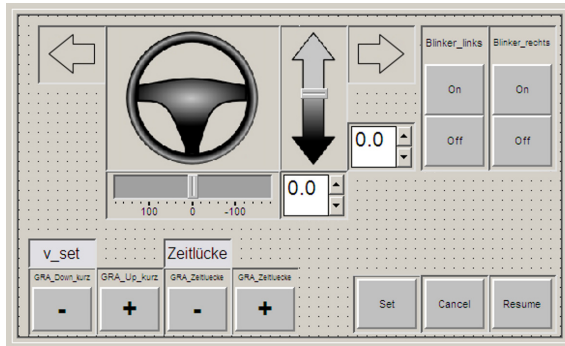


Abbildung 5.7: Einfache GUI des Simulators zur Closed-Loop-Simulation des Gesamtsystems

Abbildung 5.7 zeigt einen Ausschnitt der GUI<sup>1</sup>, mit der sich die virtuellen Bedienelemente des eigenen Fahrzeugs steuern lassen. Weiterhin sind Bedienelemente zur Steuerung von Umfeldobjekten sowie verschiedene Anzeigen von Zustandsgrößen vorhanden. Die Bedienung kann wahlweise mit der Tastatur oder auch mit einem Joystick beziehungsweise Lenkrad erfolgen. Zur Erstellung solcher Bedienoberflächen stehen eine Vielzahl vorgefertigter GUI-Elemente zur Verfügung. Dazu gehören Push-Buttons, Checkboxes, Drop-Down-Menüs oder Radiobuttons. Komplexe Parameteranpassungen, z. B. Änderung eines Parameters in Abhängigkeit eines anderen, lassen sich über einfache Python-Skripte realisieren. Mit Hilfe dieses interaktiven Simulators lässt sich das System für einfache Fahrmanöver sehr schnell untersuchen, ohne tatsächlich Fahrversuche durchführen zu müssen.

Da die Simulation stets nur ein idealisiertes Abbild der Realität darstellt und insbesondere Abstimmarbeiten ohne reale Aktoren nur eingeschränkt möglich sind, erfordert die Entwicklung von Fahrzeugfunktionen stets auch reale Fahrversuche. Nachdem die Grundfunktionalität des Modells durch Simulationen sichergestellt ist, erfolgt daher der Test im Experimentalfahrzeug. Aus dem Simulink-Modell wird mittels eines Codegenerators dazu sehr effizienter ANSI<sup>2</sup> C-Code (Broy u. a. 2007) erzeugt, der für verschiedene Plattformen, u. a. die hier eingesetzte dSpace Autobox, kompiliert werden kann. Diese Portierbarkeit erlaubt es, dasselbe Modell einerseits für Forschungsarbeiten mit entsprechend prototypischer Hardware und andererseits für den Einsatz mit

<sup>1</sup> Graphical User Interface, Graphische Benutzeroberfläche

<sup>2</sup> American National Standards Institute

Komponenten aus der Massenproduktion zu verwenden. Mit Hilfe der bereits erwähnten Softwareschnittstelle lassen sich nahezu alle Parameter des Modells zur Laufzeit verändern sowie interne Größen in numerischen Anzeigen oder auch in Diagrammen als Funktion der Zeit visualisieren.

### 5.3.2 Softwarebibliothek für Bayes'sche Netze

Im Rahmen dieser Arbeit wird Wert auf eine durchgängige Verwendung der Hard- und Softwarekomponenten gelegt. Für die Erstellung Bayes'scher Netze bedeutet dies insbesondere eine Modellierung mittels Simulink. Für Matlab wurde von [Murphy \(2002a\)](#) ein Rahmenwerk zur Erzeugung Bayes'scher Netze vorgestellt. Dies erfordert jedoch die textuelle Spezifikation der Netze und bietet daher einen weniger intuitiven Zugang. Schwerwiegender bei diesem Rahmenwerk ist jedoch die Verwendung von besonderen Konstrukten, die inkompatibel zum in dieser Arbeit verwendeten Codegenerator sind und einen Einsatz der Modelle im Experimentalfahrzeug damit verhindern. Mit Hilfe der Inferenzmechanismen aus Abschnitt [4.3.3](#) und der Struktur nach Abbildung [4.13](#) ist es möglich, eine Inferenzmaschine zu erzeugen, welche ein einzelnes Netz auswerten kann. Dies würde Erweiterungen hinsichtlich anderer Fahrsituationen und beeinflussender Merkmale jedoch stark erschweren.

Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Simulink-Bibliothek (*sIBNT*, *Simulink Bayesian Network Toolbox*) für Netzstrukturen nach Abschnitt [4.5.1](#) entwickelt (siehe Abbildung [5.8](#)). Die wesentlichen Anforderungen dabei waren:

- Unterstützung von dreistufigen Netzen nach Abbildung [4.10](#)
- Kompatibilität zum eingesetzten Codegenerator
- Modellierung der Netze mittels Simulink
- Interaktive, unterstützte Parametrisierung

In Analogie zu ihrer gewöhnlichen graphischen Repräsentation sollten Knoten und Kanten des Bayes'schen Netzes als Subsysteme bzw. Signalflussverbindungen modelliert werden. Die Bibliothek stellt dazu neue Blöcke für Simulink-Modelle zur Verfügung, die den Aufbau eines Bayes'schen Netzes ermöglichen. Dabei wurde auch das optische Erscheinungsbild der Subsysteme angepasst, sodass Knoten wie in vielen anderen Modellierungswerkzeugen als Ovale dargestellt werden. Um die Ausgänge mehrerer Knoten mit einem anderen Knoten verbinden zu können, sind Verbindungselemen-

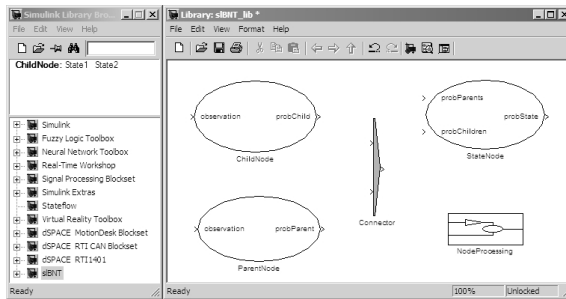


Abbildung 5.8: Bildschirmkopie der Bibliothek sIBNT in Simulink

te (Konnektoren) notwendig. Abgeleitet von Abbildung 4.10 sind die Blöcke der Bibliothek:

- Elternknoten (*ParentNode*)
- Kindknoten (*ChildNode*)
- Inferenzknoten (*InferenceNode*)
- Konnektor (*Connector*)

Mit der Klasse der Elternknoten lassen sich Motivatoren und Restriktoren darstellen. Indikatoren werden durch Kindknoten repräsentiert und ein Fahrmanöver wird durch einen Inferenzknoten modelliert. Da z. B. die Anzahl an Parametern eines Knotens von der Struktur des Gesamtnetzes abhängt, ist es notwendig, dass einige Knoten Wissen über andere Teile des Bayes'schen Netzes erhalten. Die Signalflüsse zwischen Subsystemen sind dafür ungeeignet, da sie auf numerische Datentypen beschränkt sind und damit beispielsweise keine Übergabe von Zustandsnamen ermöglichen. Um einen solchen Datenaustausch zu realisieren, werden folgende Mechanismen verwendet: Subsystemattribute und einheitliche Maskentypen (*MaskType*). Subsystemattribute sind vordefinierte Datenfelder von Subsystemen, die mittels Rückruffunktionen (*Callbacks*) beschrieben werden können. Damit können beispielsweise die Zustände eines Knotens in Form von einem Vektor gespeichert werden. Maskentypen sind ebenfalls Attribute von Blöcken. Der Wert eines Maskentyps ist für alle Instanzen eines Blocktyps identisch und dient zur Identifikation von Blocktypen. Die einzelnen Blöcke der Bibliothek und die Funktionsweise werden im Folgenden dargestellt. Da die Anzahl und Struktur der Parameter eines Knotens stets von seinen Vorgängerknoten abhängt, wird das Netz ausgehend von der Klasse der Elternknoten erläutert.



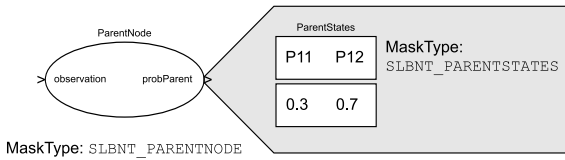


Abbildung 5.9: Elternknoten aus der Bibliothek SLBNT

Ein Elternknoten verfügt über einen skalaren Eingang und einen vektorwertigen Ausgang. Innerhalb des Elterknotens (Abbildung 5.9) steht dem Benutzer eine Eingabemaske zur Verfügung, in der er in Form einer durch Kommata getrennten Liste die Zustände des Elternknotens eingeben kann. Mit diesem Block ist eine Funktion verbunden, welche die Zustände, hier P11 und P12, formatiert und als Beschriftung des Subsystems oberhalb eines numerischen Eingangsblocks dargestellt. Diese Funktion speichert die Zustände ebenfalls als Subsystemattribut des Elternknotens. Der numerische Eingangsblock dient dem Nutzer zur Eingabe der unbedingten Wahrscheinlichkeiten der Zustände des Elternknotens in Form eines Vektors. Die Reihenfolge wird dabei durch den Block zur Eingabe der Zustände vorgegeben. Der Elternknoten verfügt weiterhin über eine Nachschlagetabelle, mit der die Zuordnung von dem unter Umständen kontinuierlichen Eingangswert zu einem der diskreten Zustände realisiert wird. Darüber hinaus befindet sich ein Subsystem innerhalb des Elternknotens, das zur Berechnung des Ausgangsvektors dient. Im Fall eines nicht beobachteten Elternknotens entspricht dieser dem Vektor der Apriori-Wahrscheinlichkeiten. Für einen beobachteten Elternknoten trägt der entsprechende Zustand eine Wahrscheinlichkeit von 100 %, die Wahrscheinlichkeit der übrigen Zustände beträgt 0 %.

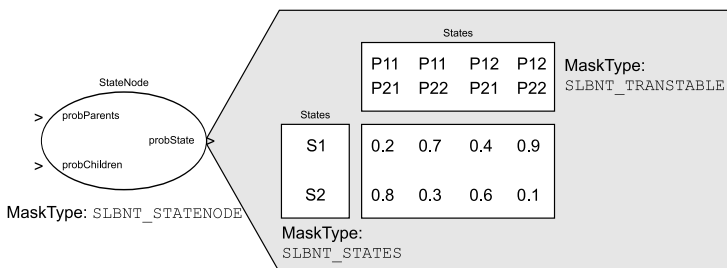


Abbildung 5.10: Unbekannter Zustandsknoten aus der Bibliothek SLBNT

Der Inferenzknoten (Abbildung 5.10) stellt die Zufallsvariable dar, für deren

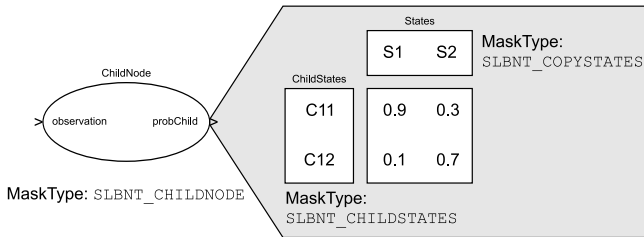


Abbildung 5.11: Kindknoten aus der Bibliothek slBNT

Zustände die Wahrscheinlichkeiten bestimmt werden sollen. Er verfügt über zwei vektorwertige Eingänge für die aggregierten Eltern- und Kindknoten sowie einen vektorwertigen Ausgang, über den die Wahrscheinlichkeiten der Zustände zur weiteren Verarbeitung bereitgestellt werden. Zunächst ist die Angabe der Zustände des Inferenzknotens, hier S1 und S2, erforderlich. Dafür steht analog zum Elternknoten eine Eingabemaske zur Verfügung. Es erfolgt eine automatisch formatierte Darstellung der Zustände und Speicherung in Subsystemattributen. Für die Eingabe der bedingten Wahrscheinlichkeiten ist Kenntnis über die Elternknoten und ihre Zustände erforderlich. Dazu sucht eine Funktion, welche an den Block mit dem Maskentyp `SLBNT_TRANSTABLE` gebunden ist, oberhalb des Zustandsknotens nach allen Elternknoten (hier P1, P2) und liest deren Zustände (hier P11, P12 bzw. P21, P22) aus. Die Identifikation erfolgt dabei über den Maskentyp. Durch Permutation der Zustände entsteht die in Abbildung 5.10 dargestellte Tafel, die als Formatvorlage für die Eingabe der Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix verwendet werden kann.

Ein Kindknoten (Abbildung 5.11) weist einen skalaren Eingang für Observationen und einen vektorwertigen Ausgang für die beobachteten Zustände auf. Bei fehlender Kenntnis über den Zustand des Kindknotens werden identische Wahrscheinlichkeiten für seine Zustände ausgegeben. Gegebenenfalls wird eine Diskretisierung des Eingangssignals durchgeführt. Die Eingabe und Darstellung der Zustände erfolgt analog zu den anderen Knoten. Dabei werden hier die Zustände des Inferenzknotens ausgelesen und für eine Formatvorlage herangezogen.

Um das manuelle Erzeugen von Eingängen bei der Verbindung mehrerer Knoten mit einem weiteren zu vermeiden und ein übersichtliches Layout des Modells zu ermöglichen, werden Konnektoren verwendet (Abbildung 5.12). Diese verfügen über eine Eingabemaske, in der die Anzahl der zu verbindenden Knoten sowie der Typ (Eltern- oder Kindknoten) angegeben werden kann.

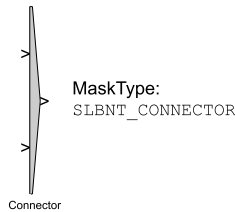


Abbildung 5.12: Konnektor aus der Bibliothek sIBNT zur Verbindung mehrerer Eltern- bzw. Kindknoten

Die Konnektoren für Eltern- und Kindknoten haben einige gemeinsame Methoden (z. B. Mechanismus zum Generieren bzw. Entfernen von Eingängen) und weisen spezielle Implementierungen für die Verarbeitung der Eingänge auf. Die Ausgangsvektoren der Elternknoten werden zu einem Zeilenvektor verbunden, die Vektoren der Kindknoten werden zeilenweise zu einer Matrix kombiniert. Sie hat die Dimensionen <Anzahl der Kindknoten> und <Anzahl der Zustände des Inferenzknotens>.

Abbildung 5.13 gibt einen Überblick wie die Bestandteile von sIBNT verbunden werden können. Es können beliebig viele Elternknoten über einen Konnektor an einen Inferenzknoten gebunden werden. Ebenfalls kann der Inferenzknoten eine beliebige Anzahl an Kindknoten aufweisen. Die Ebene der Elternknoten wie auch der Kindknoten kann außerdem vollständig fehlen. Alle Komponenten der Bibliothek sIBNT sind direkt in Matlab und Simulink ohne externe Abhängigkeiten realisiert. Die Toolbox ist ohne Einschränkungen kompatibel zum verwendeten Codgenerator und fügt sich so nahtlos in die bestehende Entwicklungslandschaft ein. Beispielhaft ist in Abbildung 5.14 der Netzaufbau der bereits in Abschnitt 4.3 untersuchten Diebstahlwarnanlage gezeigt. Observierte Knoten sind schattiert dargestellt. Da die Verbindungen zwischen Subsystemen Signalflüsse darstellen, stimmt die Pfeilrichtung eines Bayes'schen Netzes bei der Modellierung mittels sIBNT nicht an jeder Stelle mit seiner gewöhnlichen graphischen Repräsentation überein – im Fall der Kindebene kommt es zu Abweichungen.

## 5.4 Test

Insbesondere bei der Verwendung von probabilistischen Methoden wie in dieser Arbeit besteht die Notwendigkeit für Softwaretests (Rumpe u. a. 2006). Ein

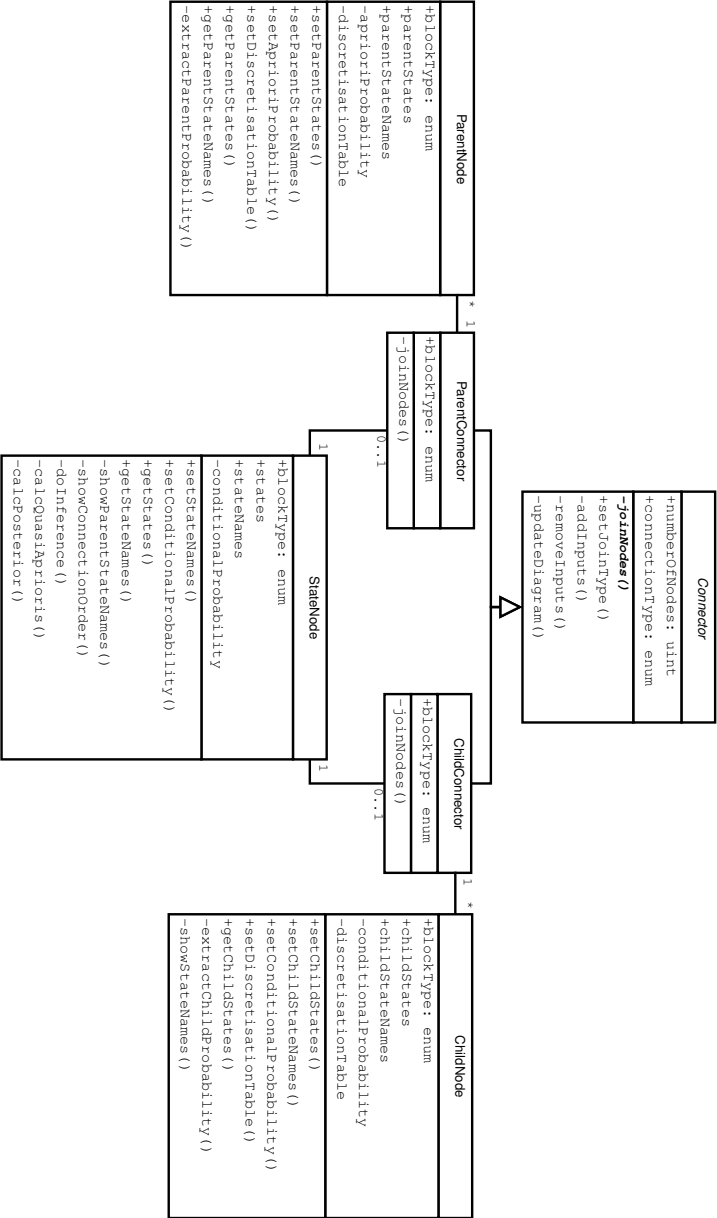


Abbildung 5.13: Struktur der Bibliothek sIBNT für den Aufbau Bayes'scher Netze und zur Inferenzbildung

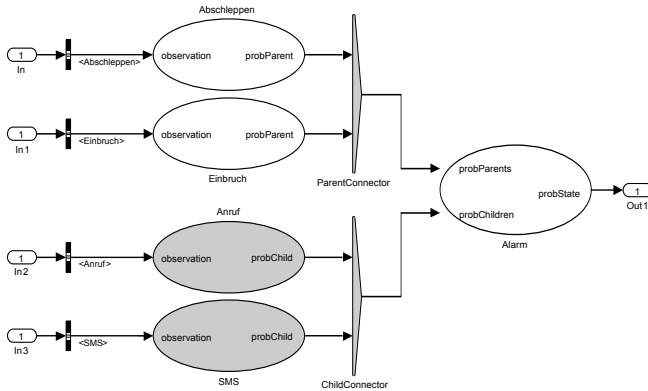


Abbildung 5.14: Bayes'sches Netz einer Diebstahlwarnanlage mit sIBNT

zentrales Prinzip von dabei eingesetzten Unit-Tests ist, dass die Programmiersprache zur Erzeugung der Testfälle identisch mit der Sprache des zu testenden Codes (Testling, *system under test*) sein soll.

In Anlehnung an Modultest-Software für textuelle Programmiersprachen wurde von [Dohmke und Gollee \(2007\)](#) ein interaktives Rahmenwerk für Simulink vorgestellt (slUnit), das ausschließlich auf Matlab und Simulink selbst basiert. Abbildung 5.15 zeigt einen beispielhaften Aufbau einer Testfallsammlung (*test suite*), die mittels slUnit erstellt wurde. Eine Testfallsammlung besteht dabei aus dem Testling, mindestens einem Testfall und einem speziellen Umschalter (*Multiplexer*). Da in einer Simulation stets nur ein Testfall aktiv sein kann, werden die Testfälle von dem Umschalter sequentiell aktiviert. Dies und die Tatsache, dass der Testling für alle Testfälle identisch ist, erfordert es, dass auch die Schnittstellen der Testfälle identisch sind. Da das Ausführen der Tests einer gewöhnlichen Simulation entspricht, kann auch zeitveränderliches Verhalten berücksichtigt werden. Testfälle sind besondere Subsysteme, deren Subsystemmaske ein spezielles Attribut trägt, um sie z. B. vom Testling unterscheiden zu können. Sie enthalten mindestens einen *Assert*-Block. Der *Assert*-Block dient zur Auswertung, ob ein Test bestanden wurde. Sobald das Signal an einem Eingang des *Assert*-Blocks in einem Zeitschritt der Simulation den booleschen Wert *falsch* annimmt, gilt der Test, in dem sich der Block befindet, als nicht bestanden. Wenn ein Testfall mehrere *Assert*-Blöcke enthält, kann jeder dieser Blöcke ein Fehlschlagen des Testfalls bewirken. Die Struktur und die möglichen Verknüpfungen aller Elemente von slUnit stellt

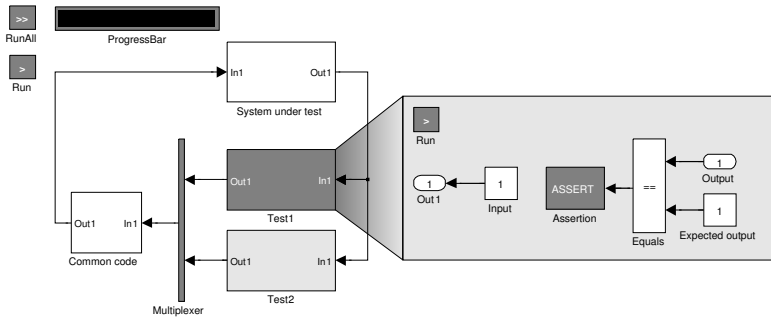


Abbildung 5.15: Testfallsammlung von sUnit bestehend aus zwei Testfällen mit interaktiven Bedienelementen und Ergebnisanzeige durch Einfärben der Testfall-Subsysteme

Abbildung 5.16 schematisch dar.

Sollte es Vorbedingungen für die Ausführung von Tests geben (*test fixtures*), z. B. das Laden von Testdaten, so werden diese bei anderen xUnit-Frameworks meist von `setUp`-Methoden erzeugt. Nach Durchführung der Tests beseitigt eine `tearDown`-Methode das Test-Fixture wieder. Die Behandlung von Test-Fixtures kann in sUnit durch Callback-Funktionen erfolgen, die fester Bestandteil von Simulink sind. Modellelemente, die von allen Testfällen benötigt werden (*common code*), können in einem gewöhnlichen Subsystem aggregiert werden. Der Testling ist ein gewöhnliches Simulink-Subsystem, das die zu testenden Blöcke enthält. GUI-Elemente von sUnit dienen dazu, einzelne (*Run*) oder alle (*RunAll*) Tests der Testfallsammlung auszuführen. Eine Fortschrittsanzeige (*Progress Bar*) informiert dabei über den Status der Testfallausführung. Die Ergebnisse der Testfälle werden durch Einfärben der entsprechenden Subsysteme dargestellt (grün: Test bestanden, rot: Test fehlgeschlagen). Die Einfärbungen sind Teil des Modells und werden daher mit dem Modell gespeichert. Dies ermöglicht es, das Ergebnis des jeweils letzten Testdurchlaufs zu kontrollieren.

Der bisher vorgestellte Umfang von sUnit ist zum interaktiven Testen und Entwickeln von Simulink-Modellen geeignet. Für den Einsatz in Projekten mit einer Vielzahl an Modulen – und somit einer Vielzahl an Modellen – ist es jedoch vor allem aus folgende Gründen unzureichend: Es fehlt eine Automatisierung über mehrere Testfallsammlungen hinweg. Ohne einen solchen Mechanismus muss jede Testfallsammlung manuell gestartet werden. Außerdem ist die Anzeige der Testergebnisse auf Instrumente innerhalb der Testfall-

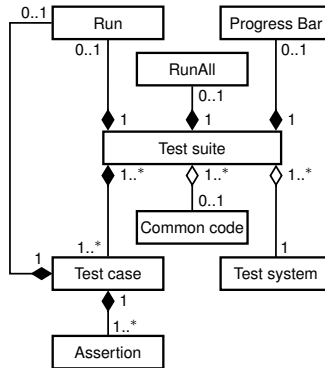


Abbildung 5.16: Struktur der Bibliothek sUnit zum Aufbau von Testfallsammlungen für Simulink

sammlung beschränkt (Einfärben der Subsysteme). Im Rahmen dieser Arbeit wurden deshalb folgende Erweiterungen entwickelt (Schroven u. a. 2009):

1. HTML-Generator zur Erstellung von Berichten (*reports*) für einzelne Testfallsammlungen
2. Methode zum automatisierten Ausführen mehrerer Testfallsammlungen
3. Erzeugung *eines* übergeordneten Zusammenfassungsberichts, der Verweise auf detaillierte Berichte enthält

Für die Berichterstattung außerhalb des Simulink-Modells wurde die Methode, welche die Simulation für einzelne Testfälle startet, um eine Schnittstelle erweitert, über die das jeweilige Testergebnis zurückgegeben wird. Mit diesem Rückgabewert sowie dem ausgelesenen Namen des Testfalls kann ein Eintrag in einer Berichtsdatei erzeugt werden. Der Bericht jeder Testfallsammlung enthält außerdem Informationen über die Ausführungszeit und -dauer sowie einen Verweis (*Hyperlink*) auf die Modelldatei der Testfallsammlung, sodass diese im Fall von nicht bestandenen Tests direkt untersucht werden kann. Innerhalb der Testfallsammlung kann weiterhin auf die Einfärbung der Subsystem zurückgegriffen werden. Im Fall eines nichtbestandenen Testfalls stehen alle Werkzeuge von Simulink, wie ein Debugger mit Einzelschrittmodus, zur Verfügung um die Fehlerursache zu identifizieren.

Zum automatisierten Ausführen mehrerer Testfallsammlungen wurde ein *Test-Runner* implementiert. Der Test-Runner koordiniert die Abarbeitung beliebig

```
1 testpath    = '<directoryString>';
2 suites      = {'suite1', ...
3               'suite2', ...
4               };
5 verbosity   = 1;
6
7 slunit_testrunner(testpath, suites, mfilename, verbosity);
```

Quellcode 5.1: Beispielhafter Aufruf des Test-Runners mit zwei Testfallsammlungen

vieler Testfallsammlungen und bildet jeweils ein Gesamtergebnis. Eine Testfallsammlung gilt dabei als *bestanden*, wenn alle enthaltenen Testfälle bestanden wurden, anderenfalls als *nicht bestanden*. Dabei wird, wie auch bei einzelnen Testfällen, zwischen dem Verletzen einer Assertion (*failure*) und einem Fehler (*error*), z. B. durch einen syntaktischen Fehler im Modell, unterschieden. Die Testfallsammlungen werden nach den xUnit-Prinzipien unabhängig voneinander ausgeführt, d. h. das Fehlschlagen einer Testfallsammlung oder auch dessen Abbruch beeinflusst nicht die Ausführung der folgenden (Meszaros 2007). Der Aufruf des Test-Runners erfordert dabei nur wenige Zeilen Code (siehe Quellcode-Beispiel 5.1). Im gegebenen Beispiel werden ein Basisverzeichnis und die zu testenden Testfallsammlungen namentlich übergeben – andere Konstruktionen wie das automatische Durchsuchen eines Basisverzeichnisses nach Testfallsammlungen sind ebenso möglich. Das Kommando `mfilename` dient dazu, den Namen des Test-Runner-Skripts zu übergeben, um automatisch einen nachvollziehbaren Namen für die übergeordnete Zusammenfassung generieren zu können. Mit dem letzten Parameter (*verbosity*), kann der Umfang des Ergebnisberichts beeinflusst werden:

**Keine Ausgabe** Es werden *keine* HTML-Berichte erzeugt. Die Testergebnisse sind allein in den Modellen der Testfallsammlungen durch Einfärbung der entsprechenden Subsysteme gespeichert.

**Zusammenfassung** Es wird einzig ein übergeordnetes Ergebnisdokument erzeugt, das die Gesamtergebnisse der einzelnen Testfallsammlungen widerspiegelt.

**Detaillierte Ausgabe** Es werden detaillierte Berichte der Testfallsammlungen und eine übergeordnete Zusammenfassung generiert.

Der übergeordnete Ergebnisbericht enthält im Fall der detaillierten Ausgabe Verweise auf das Test-Runner-Skript und die Detailberichte der Testfallsammlungen. Damit ist eine kontinuierliche Verfolgbarkeit von einer hohen Abstrak-



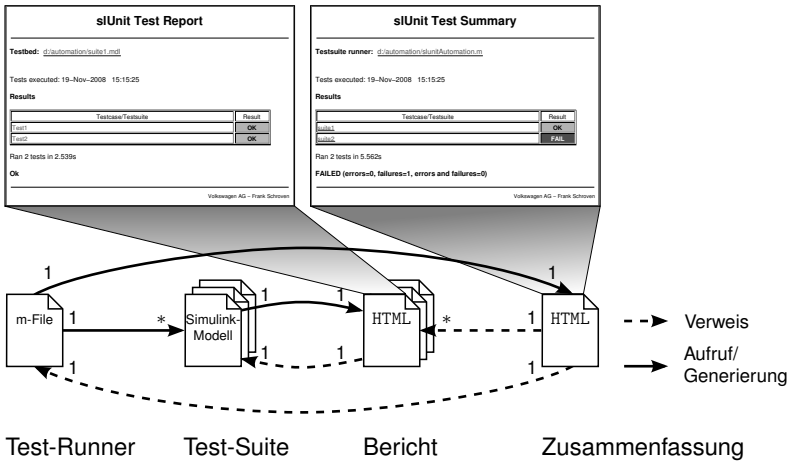


Abbildung 5.17: Zusammenhänge der beteiligten Artefakte bei automatisierter Ausführung von siUnit mit detaillierter Ausgabe

tionsebene bis zum einzelnen Testfall gegeben. Abbildung 5.17 gibt einen Überblick zu den Verbindungen der einzelnen Artefakte. Der Ablauf beim Test mehrerer Testfallsammlungen mit Hilfe des Test-Runners wird in Abbildung 5.19 zusammengefasst.

Die automatisierte Ausführung von siUnit ist für verschiedene Arten von Testfällen geeignet. Einerseits können Eingangswerte in Form von Skalaren oder Vektoren verwendet werden (Abbildung 5.15). Ebenso können komplexere Funktionen getestet werden. Abbildung 5.18 zeigt einen Testfall, der zur Überprüfung eines Reglers zur Querführung dienen kann. Die dafür notwendigen Eingangsdaten können mit Hilfe einer einmalig durchgeführten Messung ei-

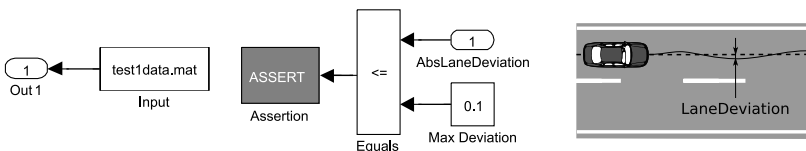


Abbildung 5.18: Testfall für siUnit bei Verwendung aufgezeichneter Daten am Beispiels eines Querführungssystems

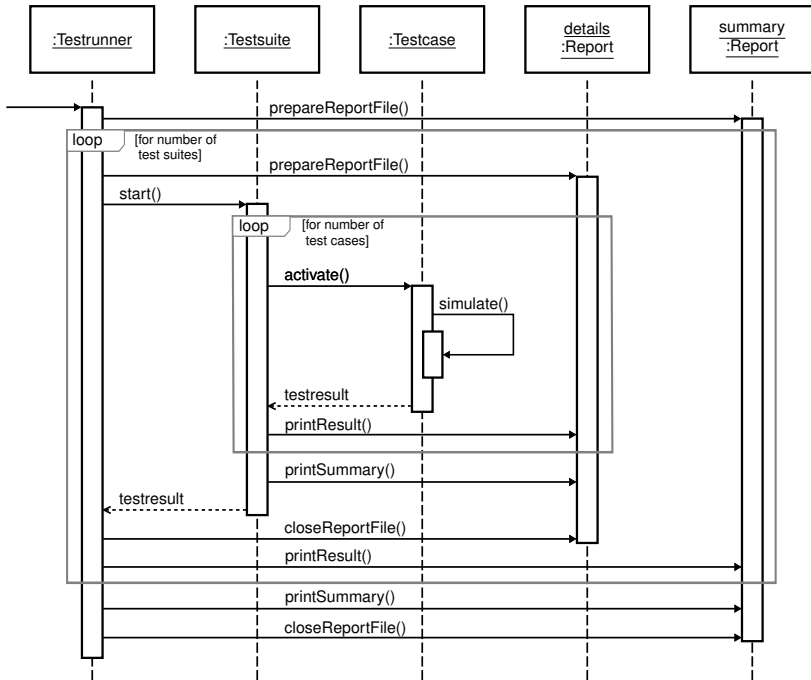


Abbildung 5.19: Sequenzdiagramm zur Automatisierung von siUnit

nes Fahrstreifenverlaufs (`test1data.mat`) generiert werden. Mit einem Fahrzeugmodell kann fortlaufend die Ausgabegröße des Reglers, z. B. Lenkmoment, zur Berechnung der Fahrzeugbewegung herangezogen werden. Mit dem bekannten Verlauf des Fahrstreifens können Eingangsgrößen eines Reglers zur Querführung, z. B. Abweichung von der Fahrstreifenmitte oder die Ausrichtung innerhalb des Fahrstreifens (Gierwinkelfehler), bestimmt werden. Als mögliches Testkriterium sei hier die Exaktheit der Querregelung in Form der lateralen Ablage angeführt. Diese kann z. B. mit einem festen Schwellwert verglichen werden, der im Beispiel zu 0,1 m gewählt wurde.

Bei Projekten geringen Umfangs kann das Modell innerhalb einer Testfallsammlung entwickelt werden. Umfangreichere Projekte sollten jedoch in Module und damit verschiedene Modelle unterteilt werden. In diesem Fall muss sichergestellt werden, dass keine Dateninkonsistenz zwischen dem Entwicklungsmodell und dem Testling einer Testfallsammlung entsteht. Dafür können

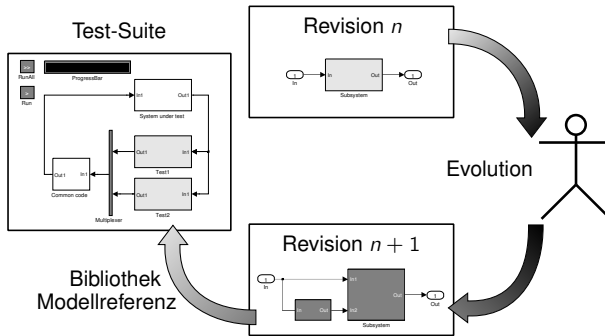


Abbildung 5.20: Automatische Aktualisierung der Testfallsammlung zur Vermeidung von Dateninkonsistenz

in Simulink Bibliotheken (*library*) oder Referenzen auf andere Modelle (*model references*) erstellt werden. Im Fall von Bibliotheken kann das Modell Verweise auf entsprechende Bibliotheksblöcke enthalten. Beim Öffnen des zu bearbeitenden Modells wird automatisch eine aktualisierte Kopie der Bibliotheksblöcke im Modell eingebunden. Ein Verweis auf eine Bibliothek kann temporär unterbrochen werden, um Änderungen direkt im Modell, das den Verweis enthält, auszuführen. Modifikationen können anschließend in der Bibliothek übernommen werden. Bei der Verwendung von Modellreferenzen werden andere Mechanismen verwendet. Für referenzierte Modelle wird C-Code generiert und für Simulationen zu einem sogenannten *model simulation target* übersetzt. Dies erlaubt inkrementelles Laden des Gesamtmodells, da es erst zur Bearbeitung benötigt wird, und vor allem inkrementelle Codegenerierung. Anderenfalls wird bei jeder Änderung des Modells Code für das gesamte Modell erzeugt und übersetzt. Abbildung 5.20 veranschaulicht wie die Testfallsammlungen bei Weiterentwicklungen an den zu testenden Subsystemen aktuell gehalten werden können.

Mit der hier beschriebenen Version von siUnit steht ein intuitiv zu bedienendes Werkzeug für den Test von Simulink-Systemen zur Verfügung, das allein auf Matlab und Simulink selbst basiert. Mit den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Erweiterungen ist eine vollständige Automatisierung der Ausführung, Auswertung und Dokumentation in hierarchischen HTML-Berichten erreicht. Damit lässt sich auch eine große Anzahl an Testfallsammlungen effizient ausführen und mit der übersichtlichen Ergebnisdarstellung schnell beurteilen. Im Fall von fehlgeschlagenen Testfällen fehlen jedoch detaillierte Einblicke in das

Testergebnis. Die Erwartungswerte und tatsächlich aufgetretenen Werte eines Testfalls können dazu in den Ergebnisbericht integriert werden. Ebenfalls ist eine ausreichende Testabdeckung wesentlich für die Aussagekraft der vorhandenen Tests. Eine solche Messung der Testabdeckung stellt ebenfalls eine denkbare und wünschenswerte Erweiterung für das Testrahmenwerk sUnit dar.

### Einsatz von sUnit zum Test von sIBNT

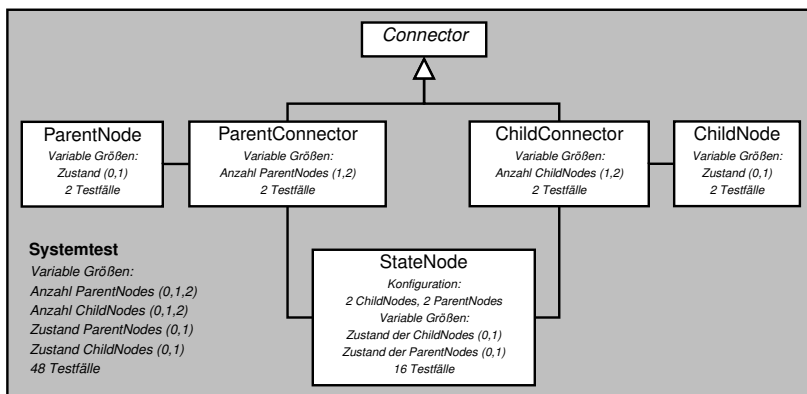


Abbildung 5.21: Übersicht zu den verschiedenen Tests zur Bibliothek sIBNT

Zur Qualitätssicherung wurden bei der Entwicklung der Bibliothek sIBNT insgesamt 72 Softwaretests erstellt. Die Testfälle wurden schnittstellenbasiert erzeugt. Zur Testausführung, -auswertung und -dokumentation konnte das erweiterte Testrahmenwerk sUnit eingesetzt werden. Damit war es möglich, die Algorithmen zur Ausgabeberechnung einzelner Knoten sowie Schnittstellen zwischen den beteiligten Knoten zu testen. Weitere Funktionen der Bibliothek, wie die beschriebene Unterstützung der Dateneingabe durch Generieren von Formatvorlagen, konnten nicht getestet werden, da sie nicht auf der Kommunikation mittels Datenverbindungen basieren. Einerseits wurden die Komponenten der Bibliothek einzeln getestet, andererseits wurden Testfälle für verschiedene exemplarische Netzstrukturen durchgeführt. Für die Tests der Kind- bzw. Elternknoten wurden die Merkmale Anzahl der Zustände und Beobachtungszustand, d. h. Eingangsgröße der Knoten, variiert. Als erwartete Ausgabe wurden die ausgegebenen Wahrscheinlichkeitswerte herangezogen. Für die Konnektoren wurden die zu verbindenden Knotentypen sowie die

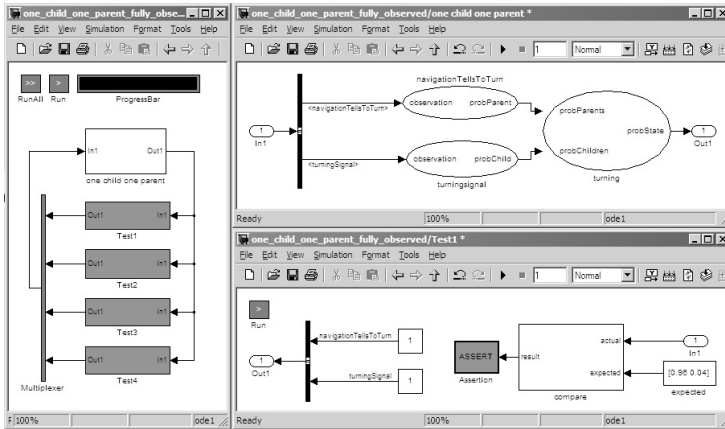


Abbildung 5.22: Bildschirmkopien einer Testfallsammlung (links), des Testlings (rechts oben) und des ersten Testfall (rechts unten)

Anzahl der Eingänge modifiziert. Dabei wurden das korrekte Umformen der Eingangsvektoren überprüft. Für den zentralen Zustandsknoten (*StateNode*) wurde in einer Konfiguration (2 Eltern-, 2 Kindeingänge) bei verschiedenen Knotenzustände die korrekte Inferenzbildung getestet. Insgesamt wurden 24 Komponententests erstellt, Abbildung 5.21 zeigt wie sich diese auf die Komponenten verteilen und welche Varianten dabei untersucht wurden.

Für den Test des Gesamtsystems wurde 8 Netzkonfigurationen verwendet, die sich hinsichtlich der Existenz bzw. Anzahl an Eltern- bzw. Kindknoten unterschieden. Durch unterschiedliche Beobachtungen der beteiligten Knoten entstanden 48 Testfälle. Als Testorakel diente dabei eine Referenzimplementierung (Decision Systems Laboratory 2007). Abbildung 5.22 zeigt beispielhaft den Gesamtsystemtest für die Konfiguration mit einem Eltern- und einem Kindknoten. Das System stellt eine naive Erkennung eines Abbiegemanövers anhand der Empfehlung eines Navigationssystems (Elternknoten *navigation-TellsToTurn*) und des Fahrtrichtungsanzeigers (Kindknoten *turningsignal*) dar. Alle Knoten weisen zwei Zustände auf. Die Testfallsammlung besteht durch Permutation der Beobachtungszustände von Eltern- und Kindknoten aus vier Testfällen. Testfall 1 stellt das Szenario dar, in dem sowohl der Fahrtrichtungsanzeiger aktiviert ist als auch das Navigationssystem ein Abbiegemanöver empfiehlt. Mit einer exemplarischen Parametrisierung wird für den Zustand *Abbiegen* eine Wahrscheinlichkeit von 96 % erwartet. Tabelle 5.1 zeigt wie

# Systemtest

Zweck: Test der Inferenzbildung, Schnittstellentest

Konfiguration: 1 Elternknoten ( $E_1, E_2$ ), 1 Kindknoten ( $K_1, K_2$ )

Nr.	Eingabe	Erwartete Ausgabe
1	$E = E_1, K = K_1$	$P(S \mid E_1, K_1) = [0,96 \quad 0,04]$
2	$E = E_1, K = K_2$	$P(S \mid E_1, K_2) = [0,62 \quad 0,38]$
3	$E = E_2, K = K_1$	$P(S \mid E_2, K_1) = [0,12 \quad 0,88]$
4	$E = E_2, K = K_2$	$P(S \mid E_2, K_2) = [0,01 \quad 0,99]$

Tabelle 5.1: Übersicht zu den Testfällen des Gesamtsystemtests für die Konfiguration 1 Elternknoten, 1 Kindknoten (2 Zustände pro Knoten)

sich die Testfälle der Testfallsammlung unterscheiden und welche Ausgabe des Manöverknoten bei korrekter Inferenzbildung erwartet wird. Beim Ausführen der Testfallsammlung wird ein HTML-Bericht generiert. Abbildung 5.23 zeigt den Bericht für die vorgestellte Testfallsammlung. Er enthält einen Verweis auf das Modell der Testfallsammlung, die Testergebnisse der einzelnen Tests und einige Details zur Ausführung.

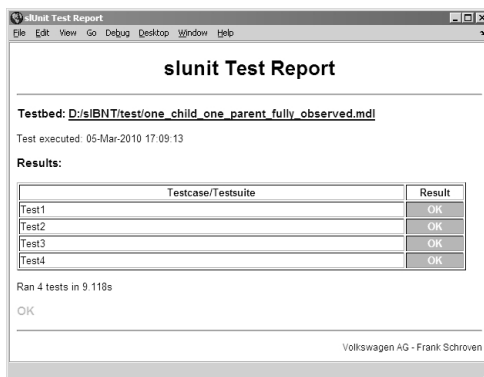


Abbildung 5.23: Bildschirmkopie des HTML-Berichts zu einer Testfallsammlung zum Test von sIBNT

Mit Hilfe der Testfälle konnten Fehler während der Erweiterung der Bibliothek sIBNT durch die automatisierte Testausführung frühzeitig gefunden werden. Aufgrund fester Schnittstellen innerhalb von sIBNT, die nur sehr wenigen Änderungen unterworfen waren, entstand über die einmalige Erzeugung der

Testfälle wenig Zusatzaufwand. Bei häufigen Schnittstellenänderungen, z. B. aufgrund einer zu kurzen Entwurfsphase, wächst der Wartungsaufwand der Testfälle jedoch. Weiterhin stellte sich bei der Verwendung von `slUnit` heraus, dass das Zusammenfassen der Testfällen zu wenigen Testfallsammlungen die Ausführungszeit für eine gegebenen Anzahl an Testfällen reduziert. Ursächlich dafür ist die Zeit, die für das Laden und Speichern der Testfallsammlungen benötigt wird.





# Kapitel 6

## Ergebnisse aus Fahrversuch und Simulation

In diesem Kapitel werden Ergebnisse aus Simulationen und realen Fahrversuchen zur Erkennung von Fahrstreifenwechseln sowie dadurch verändertes Reglerverhalten präsentiert. Dazu werden drei Fahrsituationen untersucht: Fahrstreifenwechsel nach stationärer Folgefahrt und Annäherung an ein langsames Vorderfahrzeug in zwei unterschiedlichen Ausprägungen.

### 6.1 Erkennung von Fahrstreifenwechseln

Zur Erprobung der in Kapitel 4 erarbeiteten Verfahren und Modelle zur Situationsanalyse wurden Fahrversuche durchgeführt. Es wurden Messdaten bei automatisierter Längsregelung des Fahrzeugs aufgezeichnet (z. B. andere Objekte, Fahrstreifenmarkierungen) sowie Fahrereingaben (z. B. Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers) und im Anschluss ausgewertet. Wie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben, hat die Zufallsvariable Fahrstreifenwechsel die Zustände

- keine Fahrstreifenwechselabsicht (Zustand 1),
- Vorbereitung des Fahrstreifenwechsels (Zustand 2),
- Durchführung des Fahrstreifenwechsel (Zustand 3).

Der Algorithmus zur Erkennung von Fahrstreifenwechseln wurde für eine Menge von 649 Sequenzen aus Fahrten von acht Probanden (siehe Tabelle 6.1) untersucht. Dabei haben ausschließlich Probanden mit ACC-Erfahrung teilgenommen, da sich der Umgang mit dem System mit zunehmender Nutzungsdauer verändert und nicht innerhalb der Dauer einer Versuchsfahrt stabilisiert (Winner 2003). Die Messsequenzen umfassten insgesamt 85 Fahrstreifenwechsel und 564 Situationen ohne Fahrstreifenwechsel. Die Fahrten wurden ohne einen im Fahrzeug anwesenden Versuchsleiter durchgeführt. Abbildungen 6.1 gibt einen Überblick zur Verarbeitungskette der Messdaten.

Größe	Wert
Probanden männlich	6
Probanden weiblich	2
Alter Minimum	25 Jahre
Alter Maximum	62 Jahre
Alter Mittelwert	38,8 Jahre
Anzahl mit ACC-Erfahrung	8

Tabelle 6.1: Statistische Angaben zu Probanden der Fahrversuche

Die Messdatenaufzeichnung wurde auf verschiedenen Daten-Bussen des Experimentalfahrzeugs durchgeführt. Zur weiteren Verarbeitung wurden die Rohdaten zunächst konvertiert, sodass anschließend Zeitreihen der einzelnen CAN-Signale vorlagen. Danach wurden automatisch Sequenzen mit bzw. ohne Fahrstreifenwechsel extrahiert. Fahrstreifenwechsel lassen sich anhand eines charakteristischen Verlaufs der lateralen Ablage erkennen. Für einen Fahrstreifenwechsel nach links wächst sie zunächst kontinuierlich an, weist dann einen Sprung mit Vorzeichenwechsel um eine Fahrstreifenbreite auf und wächst anschließend erneut bis das Fahrzeug die Mitte des Zielfahrstreifens erreicht hat (Abbildung 6.2a). Ausgehend vom Zeitpunkt des Fahrstreifenwechsels werden die Messdaten für ein Auswertzeitfenster von 5 Sekunden herangezogen. Zur Überprüfung von Falschdetektionen wurden aus den Messdaten außerdem Sequenzen ohne Fahrstreifenwechsel extrahiert. Nach einer Überprüfung der Eingangsdaten auf Vollständigkeit wurden einzelne Signale auf Gültigkeit überprüft. Dazu zählen beispielsweise Fahrstreifeninformationen des Kamerasystems, die während des Auswertzeitfensters durchgehend zur Verfügung stehen sollten. Weiterhin wurden nur Sequenzen berücksichtigt, bei denen die ACC-Regelung aktiv war, da der Systemkontext bei der Situationsanalyse eine wesentliche Rolle spielt (siehe Abschnitt 4.5.1). Anschließend wurden die Sequenzen auf eine gemeinsame Zeitbasis relativ zum Zeitpunkt des Fahrstreifenwechsels transformiert. Für die Auswertung wurden abschließend einzelne Signale jeder Sequenz abgelegt.

Die Sequenzen mit Fahrstreifenwechsel wurden auf das Vorhandensein eines Vorderfahrzeugs untersucht. Abbildung 6.2b zeigt die relative Häufigkeit für unterschiedliche relative Präsenzzeiten eines Führungsfahrzeugs. Diese reichen von Fahrstreifenwechseln ohne Führungsfahrzeug (Anteil mit Führungsfahrzeug = 0) bis zu solchen mit durchgehend vorhandenem Führungsfahrzeug (Anteil mit Führungsfahrzeug = 1). Der Großteil der Fahrstreifenwechsel wurde mit einem meist in der gesamten Sequenz vorhanden Vor-

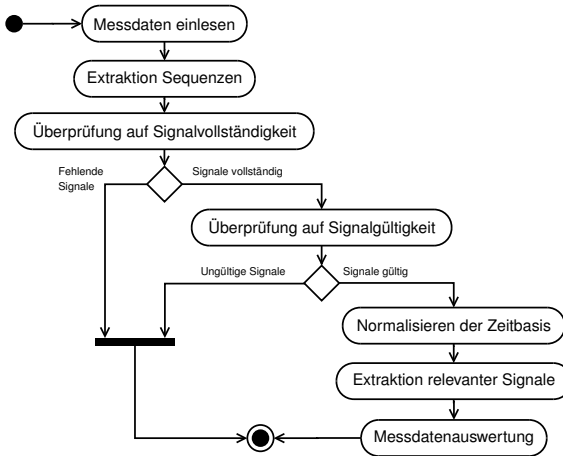


Abbildung 6.1: Aktivitätsdiagramm zur Verarbeitung der Messdaten aus Fahrversuchen

derfahrzeug durchgeführt. Die Messdaten sind daher grundsätzlich geeignet, Aussagen über Modifikationen der Abstandsregelung zu treffen, da diese bei vorhandenem Vorderfahrzeug abgesehen von Sonderfällen<sup>1</sup> wirksam ist.

Für einzelne Restriktoren bzw. Indikatoren des verwendeten 3-Ebenen-Modells (Abbildung 4.13) wurden Einzelanalysen der Eingangsdaten unternommen. Für die Zulässigkeit der Fahrstreifenwechsel wurden die Fahrstreifenmarkierungen ausgewertet. Dies stellt eine untere Abschätzung dar, da eventuell vorhandene Verkehrszeichen nicht berücksichtigt wurden. Demnach war ein durchgeführter Fahrstreifenwechsel in 2,4 % der Fälle untersagt, in 97,6% zulässig. Ein häufig verwendeter Indikator für Fahrstreifenwechsel ist der Fahr- richtungsanzeiger. Abbildung 6.3 zeigt dessen Verwendung in den hier durchgeführten Versuchsfahrten. In den Sequenzen mit Fahrstreifenwechsel wurde dieser in 87,1 % angezeigt, in 12,9 % verzichteten die Fahrer auf dessen Verwendung. Im Mittel fand eine Aktivierung 3,15 s vor dem Fahrstreifenwechsel statt<sup>2</sup>. Da das Auswertefenster vor dem Fahrstreifenwechsel 5 Sekunden betrug, treten keine früheren Aktivierungszeitpunkte auf. Die hier geschilder-

<sup>1</sup> Bei einer Wunschgeschwindigkeit unterhalb der Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs ist die Geschwindigkeitsregelung dominant.

<sup>2</sup> Die Werte zum Aktivierungszeitpunkt sind vergleichbar mit denen, die Henning u. a. (2008) ermittelt hat.

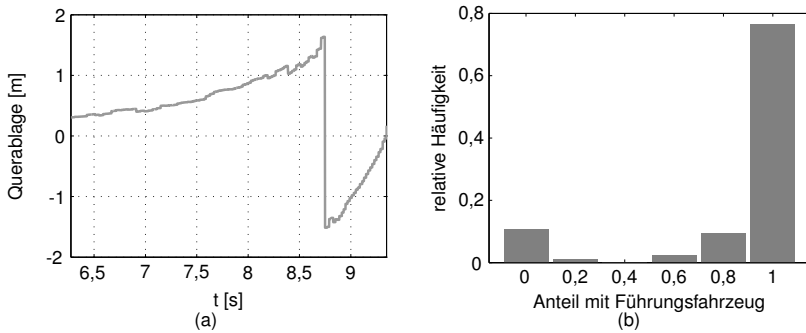


Abbildung 6.2: Beispielhafter Verlauf der lateralen Ablage innerhalb des Fahrstreifens bei einem Fahrstreifenwechsel (a) und relative Häufigkeit der Präsenz eines Vorderfahrzeugs (b)

ten Regelverletzungen der Fahrer lassen sich zum Teil auf die Tatsache zurückführen, dass die Probanden nicht durch einen Versuchsleiter begleitet wurden, der für ein gesteigertes Pflichtbewusstsein der Fahrer sorgen kann (Henning u. a. 2008). Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine maximale Detektionsleistung angestrebt. Daher wurde auch regelwidriges Verhalten nicht in der Modellierung ausgeschlossen. Die verwendeten Bayes'schen Netze würde das Abbilden solcher Regeln jedoch ohne weiteres ermöglichen.

Da die Adaption des ACC-Systems für verschiedene Situationen auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen soll (siehe Abschnitt 6.2) ist die Zeitlücke,

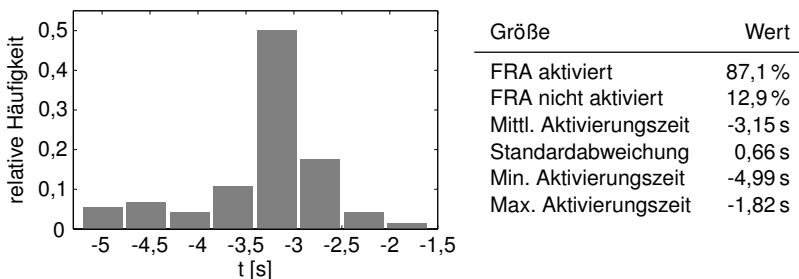


Abbildung 6.3: Verwendung und Zeitpunkt der Aktivierung des Fahrtrichtungsanzeigers (FRA) relativ zum Fahrstreifenwechsel

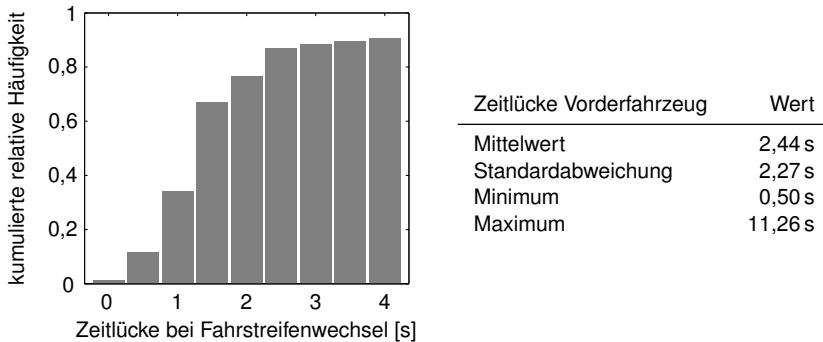


Abbildung 6.4: Statistische Angaben zur Zeitlücke zum Vorderfahrzeug zum Zeitpunkt des Fahrstreifenwechsels

bei welcher der Fahrstreifenwechsel erfolgt von Interesse. Abbildung 6.4 zeigt die Verteilung der Zeitlücken zum vorausfahrenden Fahrzeug beim Fahrstreifenwechsel<sup>3</sup>. Sie zeigt, dass etwa zwei Drittel der Fahrstreifenwechsel bei Zeitlücken größer als 1,5 Sekunden, etwa ein Drittel bei Zeitlücken größer als 2 Sekunden auftreten. Da die minimal einstellbare ACC-Zeitlücke bei 1 Sekunde liegt, bietet sich hier Raum für Zeitlückenmanipulationen. In etwa 10 % der Messungen liegt die Zeitlücke unterhalb der Grenze von 1 Sekunde, was auf ein Übersteuern des ACC-System hindeutet und ein Indiz für wünschenswerte Modifikationen darstellt.

Abbildung 6.5 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf von erkannten und realen Zuständen eines Fahrstreifenwechsels. Der *wahre Zustand* wird aus der Querposition des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens ermittelt. Als *erkannter Zustand* wird der Zustand mit maximaler Wahrscheinlichkeit bezeichnet. Der Absolutwert der Wahrscheinlichkeit kann als Maß für die Qualität der Erkennung angesehen werden und ist deshalb ebenfalls in Abbildung 6.5 dargestellt. Der Zeitpunkt  $t = 0$  s entspricht dem Moment, in dem das Kamerasystem einen Fahrstreifenwechsel detektiert. In diesem Beispiel tritt ein geringer zeitlicher Verzug zwischen wahrem und erkanntem Zustand auf.

Die erreichte Detektionleistung für alle 649 Sequenzen zeigt Abbildung 6.6 (rechts). Tatsächlich vorhandene Fahrstreifenwechsel wurden dabei zuverlässig erkannt. Die Messdaten, in denen kein Fahrstreifenwechsel vorlag,

<sup>3</sup>Zeitlücken größer als 4,5 Sekunden sind wegen der geringen relativen Klassenhäufigkeit nicht dargestellt.

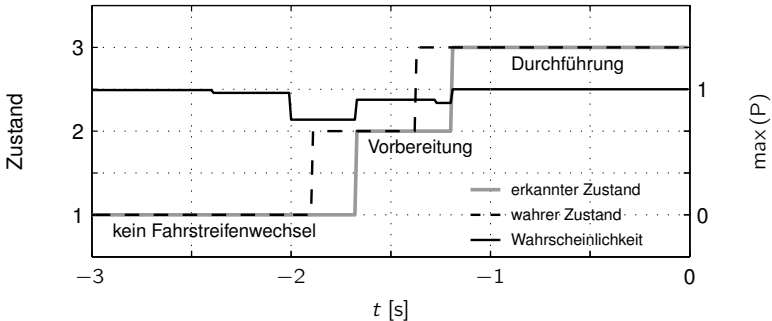


Abbildung 6.5: Tatsächlicher und erkannter Zustand eines Fahrstreifenwechsels sowie Wahrscheinlichkeit des erkannten Zustands

wurden in 98,2% entsprechend klassifiziert. Nur 1,8% der Sequenzen ohne Fahrstreifenwechsel wurde nicht korrekt ausgewertet. Die Ursachen hierfür können unterschiedlich sein: einerseits kann eine „ungünstige“ Kombination von Eingangssignalen den Klassifikator zu einer Fehlentscheidung führen, andererseits können auch abgebrochene Fahrstreifenwechsel in diese Kategorie fallen, da die Messsequenz ohne tatsächlich durchgeführten Fahrstreifenwechsel als „kein Fahrstreifenwechsel“ gekennzeichnet ist. Insgesamt konnte eine hohe Aussagesicherheit des Algorithmus erzielt werden. Abbildung 6.6 (links) zeigt die Wahrscheinlichkeit des jeweils erkannten Zustands. Im Mittel konnte eine Wahrscheinlichkeit von 91,2% erzielt werden, die Standardabweichung beträgt 4,6%.

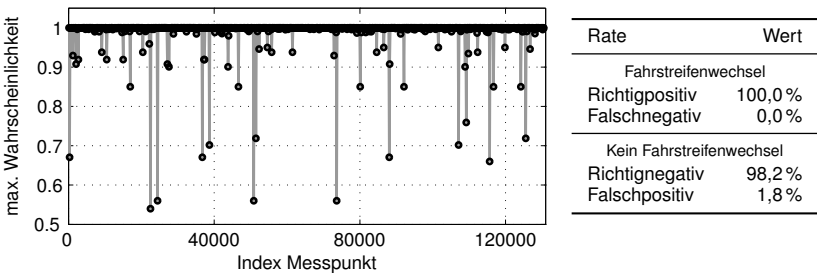


Abbildung 6.6: Detektionsleistung des Algorithmus zur Erkennung von Fahrstreifenwechseln (rechts) und Darstellung des wahrscheinlichsten Zustands für jeden Messzeitpunkt (links)

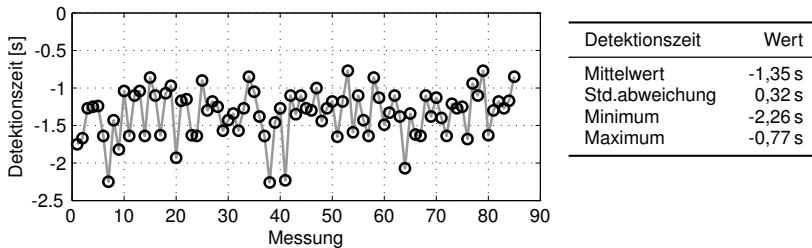


Abbildung 6.7: Statistische Angaben zum Zeitpunkt der Detektion eines Fahrstreifenwechsels

Neben der binären Entscheidung, ob ein Fahrstreifenwechsel detektiert wurde, ist für die Verwendung der Detektion relevant, zu welchem Zeitpunkt sie erfolgt. Abbildung 6.7 zeigt statistische Angaben, die aus der Menge der richtig positiv klassifizierten Messdaten abgeleitet wurde. Im Mittel wurde der Fahrstreifenwechsel mit einem Vorlauf von 1,35 s erkannt. Die Verteilung des Erkennungszeitpunkts weist dabei eine Standardabweichung von 0,32 s auf. Die früheste Erkennung erfolgte für die untersuchten Messdaten 2,26 s vor dem Fahrstreifenwechsel.

## 6.2 Verhaltensänderung der Längsregelung

Zur Manipulation des Längsregelverhaltens stehen entsprechend der Reglerstruktur (Abschnitt 2.5) verschiedene Einflussmöglichkeiten zur Verfügung, die abhängig von der Fahrsituationen angewendet werden können. Um dies zu verdeutlichen, werden drei Fahrsituationen vorgestellt, in denen sowohl Modifikationen des Geschwindigkeitsreglers als auch des Abstandsreglers vorgenommen wurden. Dabei wird das veränderte Verhalten jeweils mit dem Verhalten ohne Manipulation in Simulationen verglichen.

### Fahrstreifenwechsel nach stationärer Folgefahrt

Wenn ein Fahrer aus einer stationären Folgefahrt hinter einem langsamen Fahrzeug den Fahrstreifen nach links wechselt und sich dort kein relevantes Vorderfahrzeug befindet, soll ein dynamisches Beschleunigungsverhalten erzielt werden, um die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers in angemessener Zeit zu erreichen. Durch die frühzeitige Erkennung des Manövers kann der Geschwindigkeitsregler angepasst werden. Abbildung 6.8 zeigt die zeitli-

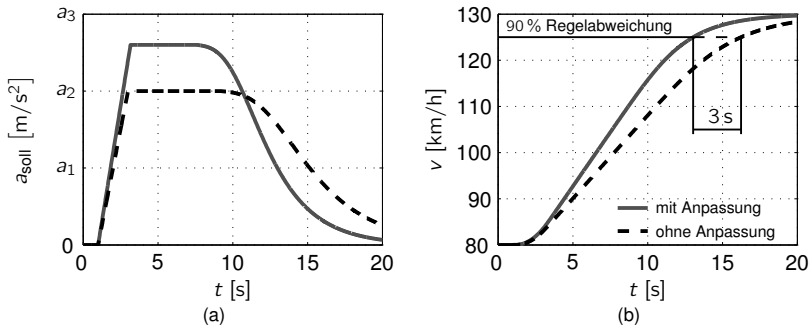


Abbildung 6.8: Sollbeschleunigung (a) und Fahrzeuggeschwindigkeit (b) mit bzw. ohne Anpassung des Reglerverhaltens; mögliches Szenario: Fahrstreifenwechsel nach Folgefahrt hinter einem Lkw

chen Verläufe der Sollbeschleunigung und der Fahrzeuggeschwindigkeit mit und ohne Anpassung des Regelsystems. In der gewählten Beispielszene beträgt die Geschwindigkeit während der Folgefahrt 80  $\text{km/h}$  (z. B. Lkw), die Wunschgeschwindigkeit des Fahrer 130  $\text{km/h}$ . Die Anpassung der Reglerparameter führt zu einem schnelleren Aufbau der Beschleunigung (Anpassung der Gradientenbegrenzung) sowie einem höheren Beschleunigungsmaximum gegenüber der Regelung ohne Berücksichtigung der Fahrsituation. Dies bewirkt ein schnelleres Einregeln der Wunschgeschwindigkeit. Für den gewählten Versuchsaufbau werden 90 % der Regelabweichung mit Regleradaptation 3 Sekunden früher erreicht als ohne eine Anpassung.

### Annäherung mit Fahrstreifenwechsel

Bei der Annäherung an ein langsamerer Vorderfahrzeug soll hier eine Unterschreitung des Abstand, der ansonsten zu einem vorausfahrenden Fahrzeug gehalten wird, toleriert werden, wenn dadurch ein Bremsmanöver vor einem Fahrstreifenwechsel vermieden werden kann. Das veränderte Verhalten bei einer solchen Anpassung gegenüber der nicht angepassten Reglerauslegung zeigt Abbildung 6.9. Das geregelte Fahrzeug nähert sich mit einer Geschwindigkeit von  $v_{\text{Ego}} = v_{\text{Wunsch}} = 130 \text{ km/h}$  einem langsameren Fahrzeug ( $v_{\text{Obj}} = 100 \text{ km/h}$ ). Ohne Anpassung des Regelsystems wird zunächst eine Bremsung eingeleitet. Die dadurch auftretende Abweichung zur Wunschgeschwindigkeit wird nach der Objektfreigabe infolge des Fahrstreifenwechsels durch eine positive Beschleunigung kompensiert. Der Bremseneingriff (und da-



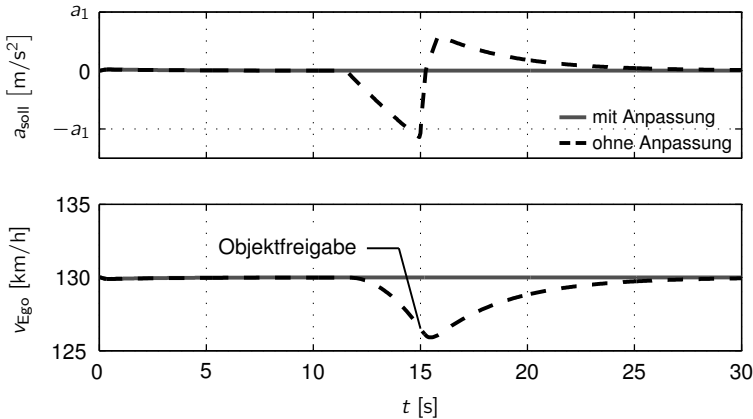


Abbildung 6.9: Sollbeschleunigung und Geschwindigkeit mit bzw. ohne Anpassung des Reglerverhaltens bei Annäherung an ein langsamerer Vorderfahrzeug mit Fahrstreifenwechsel

mit auch die Beschleunigungsphase) kann durch Manipulation des Regelsystems vermieden werden. Die Modifikation besteht in diesem Fall aus der temporären Reduktion der Sollzeitlücke zum Vorderfahrzeug von 1,8 auf 1,0 Sekunden. Damit wird ein Bremsingriff zu späteren Zeitpunkten verschoben bzw. wie hier umgangen.

### Annäherung ohne Fahrstreifenwechsel

Im Gegensatz zur vorangegangenen Fahrsituation ist bei einer Annäherung an ein langsamerer Fahrzeug *ohne* Fahrstreifenwechselwunsch eine frühzeitige Reduktion der Geschwindigkeit und ein sanfter Bremsingriff wünschenswert. Eine Anpassung der Sollzeitlücke ist hier nicht geeignet, da hierdurch auch der stationäre Endwert der Abstandsregelung verändert würde. Ziel führend ist hingegen eine Modifikation der Schaltfunktion. Zu diesem Zweck eignet sich eine Verringerung des Betrags der Schaltgeradensteigung und ein Abflachen der rechtsseitig angeschlossenen Parabel (siehe Abbildung 2.11). Hier wird erneut eine Annäherung mit einer Geschwindigkeit von 130 km/h an ein langsamerer Vorderfahrzeug ( $v_{obj} = 80$  km/h) betrachtet. Abbildung 6.10 zeigt die zeitlichen Verläufe der Sollbeschleunigung, des Abstands zum Vorderfahrzeug sowie der Geschwindigkeit und die Phasenraumdarstellung. Der Systemzustand befindet sich zu Beginn des Manövers in der inneren positiven

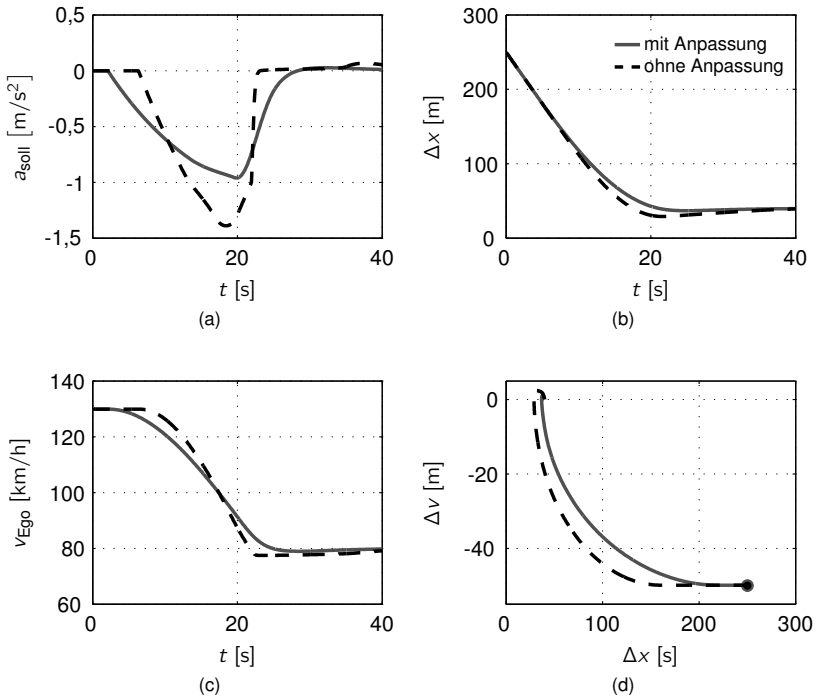


Abbildung 6.10: Sollbeschleunigung (a), Abstand (b), Geschwindigkeit (c) und Phasenraumdarstellung bei Annäherung an ein langsames Vorderfahrzeug

Grenzschicht (siehe Abbildung 2.11, II-III) und nähert sich der Schaltkurve von rechts. Durch einen flacheren Verlauf wird die Schaltkurve früher erreicht, sodass es frühzeitig zu einer negativen Sollbeschleunigung kommt. Aufgrund des früheren Eingriffs werden geringe Verzögerungswerte angefordert. Außerdem tritt kein Unterschreiten des Wunschabstands auf.

### 6.3 Ergebnisbetrachtung

Der verwendete Algorithmus zur Erkennung von Fahrstreifenwechseln zeigte eine hohe Detektionsrate bei nur wenigen Fehlklassifikationen. Für die Verhaltensanpassung des ACC-Systems nach stationärer Folgefahrt sind die er-

zielten Detektionszeiten sehr gut geeignet. Im Fall von Annäherungsmanövern können Bremsungen in jedem Fall reduziert, d. h. zeitlich verzögert, werden. Dies ist einerseits von der Szene abhängig, andererseits vom Zeitpunkt des Fahrstreifenwechsels. Bei nicht ausreichend früher Erkennung würde das Fahrzeug zunächst verzögern und bei der beschriebenen Verhaltensanpassung die Bremsung anschließend reduzieren bzw. beenden. In weiteren Fahrversuchen mit Probanden könnte untersucht werden, wie ein solches Verhalten beurteilt wird. Dabei sind unterschiedliche Ergebnisse denkbar: Ein zwischenzeitlicher Bremseingriff könnte als störend empfunden werden. Ebenso ist eine positive Reaktion denkbar, da dem Fahrer so mitgeteilt wird, dass das ACC-System das Vorderfahrzeug erkannt hat, sich nach erkanntem Manöver dann jedoch zunächst aus der Verzögerung zurückzieht. Für Annäherungsmanöver ohne Fahrstreifenwechselabsicht kann eine frühzeitige Anpassung des ACC-Systems realisiert werden, da in den untersuchten Messdaten ohne Fahrstreifenwechsel durchgehend eine hohe Aussagesicherheit für das Verbleiben im eigenen Fahrstreifen erreicht wurde. Die hier vorgestellte Variante des Klassifikators ist auf eine maximale Detektionsleistung hinsichtlich korrekter Klassifikation optimiert. Ein anderes Optimierungsziel könnten die Detektionszeitpunkte für Fahrstreifenwechsel sein, um bei Annäherungsmanövern frühzeitiger reagieren zu können. Eine solche Auslegung würde voraussichtlich mit einer steigenden Falsch-Positiv-Detektionsrate einhergehen. Welche Strategie bei diesem Zielkonflikt von Fahrer bevorzugt wird, muss in weiteren Untersuchungen adressiert werden.



## Kapitel 7

### Zusammenfassung und Ausblick

Fahrerassistenzsysteme können zur Steigerung des Fahrkomforts und der Fahrsicherheit beitragen. Aufgrund der Ausweitung des Einsatzbereichs von Assistenzsystemen von der Stabilisierung- und Navigationsebene hin zur Bahnführungsebene nimmt die Anzahl der adressierten Fahrsituationen stark zu. Heutige modular entwickelte Fahrerassistenzsysteme der Bahnführungsebene konzentrieren sich meist auf einzelne Aspekte und weisen wenig Vernetzung bezüglich der Umfelddaten auf. Mit zunehmendem Ausrüstungsgrad und der fortschreitenden Integration von Systemen wird diese Vernetzung steigen. Dies erlaubt eine umfassendere Analyse der Fahrsituation als es den Einzelsystemen möglich ist.

Ziel dieser Arbeit war es, Mechanismen für eine solche Situationsanalyse zu identifizieren und damit exemplarisch Fahrstreifenwechsel zu erkennen. Diese Erkennung sollte anschließend dazu genutzt werden, das Verhalten einer automatisierten Längsregelung zu beeinflussen. Zunächst wurden dafür die Aktivitäten, die bei einer prototypischen Entwicklung neuartiger Fahrerassistenzsysteme von Bedeutung sind, erläutert. Dazu wurden verschiedene Ausgangspunkte für Weiterentwicklungen oder Systemneuentwicklungen aufgezeigt. Für die Analyse wurde dargestellt, welche Parteien Anforderungen an neue Fahrerassistenzsysteme haben und welche Sichten bei der Modellierung des System zur Anwendung kommen. Anschließend wurde hervorgehoben, wie Muster den Entwurfsprozess unterstützen können. Darüber hinaus wurde auf verschiedene Möglichkeiten zur Kommunikation zwischen Komponenten und Mechanismen zur sicheren Ansteuerung von Fahrzeugaktoren eingegangen. Hinsichtlich der Aktivität der Implementierung wurde auf die Bedeutung von Codierungsrichtlinien und Systemintrospektion hingewiesen. Zur Entwicklung und Qualitätssicherung des Fahrerassistenzsystems wurde eine Vielzahl an möglichen Testverfahren vorgestellt, die sich von Simulationen über Objektimitationen bis zu Realtests erstrecken.

Für die Situationsanalyse wurden zunächst verschiedene Verfahren untersucht, die Schlussfolgerungen bei einer gewissen Beobachtungsmenge er-

möglichen. Mit Bayes'schen Netzen wurde eine aus drei Ebenen bestehende Netzstruktur erzeugt, die motivatorische sowie restriktive Situationsmerkmale verarbeitet und ein kausales Modell bildet. Die gewählte Struktur bietet die Möglichkeit zur Erweiterung und lässt sich auf verschiedene Manöver anwenden. Als Eingangsdaten wurden sowohl Daten aus dem Umfeld (z. B. Objekte, Fahrstreifenmarkierungen) als auch Fahrzeugdaten und Fahrereingaben verwendet. Beispielhaft wurde in dieser Arbeit eine Erkennung von Fahrstreifenwechseln auf autobahnähnlichen Straßen modelliert. Zum intuitiven Aufbau der Bayes'schen Netze wurde eine Bibliothek (sIBNT, Simulink Bayesian Network Toolbox) für die verwendete graphische Programmiersprache Simulink erzeugt. Zur Qualitätssicherung wurden u. a. automatisierte Softwaretests verwendet. Zu diesem Zweck wurde eine Modultest-Software um Mechanismen zur Automatisierung und Erstellung eines hierarchischen HTML-Berichts erweitert. Durch die im Bericht enthaltenen Verweise ist eine kontinuierliche Verfolgbarkeit von oberster Ebene der Zusammenfassung bis zu einzelnen Testfällen auf Modellebene möglich. Mit dieser Modultest-Software ist es dem Entwickler entsprechend der xUnit-Prinzipien nun möglich, eine beliebige Menge an Softwaretests und Testfallsammlungen in der Sprache des zu testenden Systems zu definieren und strukturiert ausführen zu lassen.

Der Algorithmus zur Intentionserkennung hinsichtlich Fahrstreifenwechseln wurden in Fahrversuchen evaluiert. Mit den Ergebnissen der Situationsanalyse wurde das Verhalten einer automatisierten Längsregelung manipuliert. Dazu wurde eine robuste Längsregelstruktur verwendet, die einen intuitiven Zugang zur Parametrisierung – insbesondere bei Annäherungsmanövern – bietet. In Simulationen wurden die Auswirkungen der Regleranpassung für drei verschiedene Situationen dargestellt. Abhängig von der erkannten Absicht des Fahrers den Fahrstreifen zu wechseln wurden die Dynamik (z. B. Absolutwert- und Gradientbegrenzungen) sowie Sollgrößen des Regelsystems (Sollzeitlücke) temporär verändert. Damit konnte ein situationsadaptives Reglerverhalten erreicht werden. Inwieweit sich das Verhalten der Fahrzeugführer unter Einfluss einer modifizierten Längsregelung ändert, kann Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Durch die Verwendung probabilistischer Verfahren ist es möglich, Fahrsituationen, deren Beschreibung mit Unsicherheit behaftet ist, strukturierter zu differenzieren als dies mit regelbasierten Systemen möglich wäre. Jedoch muss bei der Anpassung von Fahrerassistenzsystemen darauf geachtet werden, dass der Fahrer weiterhin ein internes Modell des Assistenzsystems entwickeln kann und das *Prinzip der Vorhersehbarkeit* (siehe [Donges 1992](#)) nicht verletzt wird. Die hier gewählte Modellstruktur ermöglicht die Einbindung weiterer Sensoren zur Situationsanalyse. So ist die Integration eines Systems

zur Erkennung der Kopfposition (Headtracker) als weiterer Indikator denkbar. Damit ließe sich beispielsweise die Suche des Fahrers nach einer geeigneten Lücke auf dem Zielfahrstreifen detektieren. Auch lassen sich Informationen über den *Fahrerzustand* einbringen. Ein ermüdeter Fahrer könnte z. B. eine höhere Akzeptanz gegenüber langsamen Vorderfahrzeugen aufweisen, sodass der erforderliche Reiz für einen Fahrstreifenwechsel steigt. Ebenso ist die Verwendung von Ortungsdaten in Verbindung mit einer digitalen Karte möglich: Wenn im Bereich einer Anschlussstelle ein Fahrzeug im rechten Nachbarfahrstreifen detektiert wird, steigt die Wahrscheinlichkeit für einen Fahrstreifenwechsel auch ohne ein langsameres Vorderfahrzeug. Damit lässt sich kooperatives Verhalten des Fahrers bei einem auf die Autobahn auffahrenden Fahrzeug modellieren. Dies würde einen weiteren Motivator im Rahmen des 3-Ebenen-Modells darstellen.

Im Gegensatz zur Längsführung oblag die Querführung im Rahmen dieser Arbeit dem Fahrer. Bei gleichzeitiger Verfügbarkeit eines Querführungssystems oder eines integrierten Regelungsansatzes sind Verbesserungen in der Erkennung der Fahrstreifenwechselabsicht zu erwarten, da eine durch den Fahrer hervorgerufene Querabweichung von der Fahrstreifenmitte als starkes Indiz für das Manöver angesehen werden kann. Weiterhin kann nicht nur die Längsregelung selbst, sondern auch die Auswahl des relevanten Objekts durch die Fahrerintentionserkennung angepasst werden. Dies kann einerseits bei ausreichendem Sensorsichtbereich zu einer frühzeitigen Berücksichtigung von Objekten im Nachbarfahrstreifen führen. Andererseits können Objekte im eigenen Fahrstreifen früher an Relevanz für die Regelung verlieren. Dabei ist zu beachten, dass ein menschlicher Fahrer die Entscheidung für einen Fahrstreifenwechsel auch kurzfristig revidieren kann. In einem solchen Fall muss sichergestellt sein, dass Fahrzeuge im eigenen Fahrstreifen rechtzeitig wieder für die Regelung berücksichtigt werden.

Der hohen Komplexität einer indirekten Manövererkennung könnte bei zukünftigen Fahrerassistenzsystemen außerdem mit einer direkten Kopplung zwischen Fahrer und Assistenzsystem begegnet werden, welche über die Angabe von einzelnen Parametern (z. B. Wunscheschwindigkeit im Fall von ACC) hinausgeht. Nach dem Beispiel von Reiter und Pferd ist eine weitere Abstraktionsebene denkbar, in welcher der Fahrer dem Assistenzsystem z. B. auf Manöverebene seinen Wunsch mitteilt (Flemisch 2004). Ein solcher Mechanismus wäre als weiterer Indikator in die hier vorgeschlagene Struktur integrierbar.





# Abbildungsverzeichnis

2.1	Allgemeine Struktur eines Fahrerassistenzsystems . . . . .	10
2.2	Experimentalfahrzeug mit Radarsensorik (a) aus dem Jahr 1974 (Mende 1999), heutiger 77 GHz-Radarsensor (inkl. Steuergerät) (b) . . . . .	18
2.3	Monokulare Kamera für ein Spurhaltesystem, Einbauort: hinter der Windschutzscheibe im vom Wischer gereinigten Bereich . . . . .	20
2.4	3D-Rekonstruktion mit einem Stereokamerasystem nach Ermittlung der Korrespondenzpunkte $B_1$ und $B_2$ . . . . .	21
2.5	Anpassung eines ACC-Systems, Konstantfahrt ( $t_1$ ), Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers und Beschleunigung innerhalb des Fahrstreifens ( $t_2 - t_3$ ) zur Vorbereitung des Fahrstreifenwechsels ( $t_4$ ) . . . . .	28
2.6	Struktur des Längsführungssystems mit Ausgabegrößen zur Aktorikbeeinflussung und Fahreranzeige . . . . .	31
2.7	Anspruchsvolle Situationen hinsichtlich der Auswahl eines relevanten ACC-Ziels bei alleiniger Verwendung eines objektgebenden Sensors und auf Fahrzeugdaten basierender Fahrstreifenprädiktion . . . . .	32
2.8	Kennlinie des Geschwindigkeitsreglers, Sollbeschleunigung $a_{\text{soll}}$ als Funktion der auszuregelnden Geschwindigkeitsdifferenz $\Delta v$ (Eigel 2010) . . . . .	34
2.9	Zeitlicher Verlauf von Relativgeschwindigkeit (a) und Abstand (b) sowie die Phasenraumdarstellung (c) für ein konstant beschleunigendes Fahrzeug ( $a_{\text{Ego}} = 1 \dots 3 \text{ m/s}^2$ ) mit anfänglich schnellerem Vorderfahrzeug . . . . .	36
2.10	Beispielhafte Systemtrajektorie (schwarz) im Phasenraum unter Einfluss einer Sliding-Mode-Regelung . . . . .	37
2.11	Sliding-Mode-Regelung mit stetigem Regelgesetz und jeweils zwei positiven und negativen Grenzsichten (Beispieltrajektorie: Annäherungsmanöver an ein langsames Vorderfahrzeug) . . . . .	39
3.1	Benutzergruppen, die Anforderungen an ein Fahrzeug haben können . . . . .	45

3.2 Beispiel eines ACC-Bedienhebels mit Beschreibung der Funktionen (Eigel 2010) . . . . .	46
3.3 Beispiel für eine Pipes & Filters-Architektur eines umfeldbasiertes Assistenzsystem zur Bremsunterstützung . . . . .	55
3.4 Beispiel einer Objektimitation in Form eines klappbaren Auslegers mit Tripelspiegel . . . . .	61
4.1 Trajektorienbüschel eines Fahrstreifenwechsels . . . . .	64
4.2 Unstrukturierte Verkehrsszene mit mehreren detektierten Objekten (links) und ihre mögliche Repräsentation in einer Belegungskarte (rechts) . . . . .	70
4.3 Beispiel eines Bayes'schen Netzes zur Ermittlung der Einbruchswahrscheinlichkeit (links) und die möglichen Zustände der einzelnen Knoten (rechts) . . . . .	75
4.4 Beispiele von zweistufigen Bayes'schen Netzen mit ungünstiger (a) bzw. günstiger (b) Struktur bezüglich der erforderlichen Anzahl von Parametern . . . . .	79
4.5 Beispiel eines einfach verbundenen (a) und eines mehrfach verbundenen (b) Bayes'schen Netzes . . . . .	83
4.6 Markov-Decke (grau) eines Knotens $S$ (a) (Russell und Norvig 2004) und die Struktur der verwendeten Bayes'schen Netze (b) . . . . .	84
4.7 Beispiel eines entrollten dynamischen Bayes'schen Netzes mit einer temporalen Kante . . . . .	86
4.8 Rückführung des entrollten dynamischen Bayes'schen Netzes (Abbildung 4.7) auf ein statisches Äquivalent (b), dafür notwendiges temporäres Netz (a) . . . . .	87
4.9 Verschiedene Sichten auf eine Fahrsituation: mit (a) bzw. ohne (b) wechselseitige Beeinflussung der Fahrzeuge . . . . .	88
4.10 3-Ebenen-Modell zur Fahrerintentionserkennung (links) und die resultierende Struktur des Bayes'schen Netzes (rechts), temporale Kanten sind nicht dargestellt . . . . .	89
4.11 Drei Zustände eines Fahrstreifenwechsels, kein Fahrstreifenwechsel (Phase 1), Vorbereitung (Phase 2), Durchführung (Phase 3) . . . . .	91
4.12 Auf die Fahrstreifenbreite normierte Ablage bei Fahrstreifenwechseln mit Geschwindigkeiten von 80 bis 170 km/h als Funktion der zurückgelegten Strecke (a) bzw. der Zeit bis zum Fahrstreifenwechsel (b) . . . . .	94
4.13 Dynamisches Bayes'sches Netz zur Erkennung von Fahrstreifenwechseln . . . . .	95

5.1	Grobstruktur des gesamten Längsführungssystems . . . . .	99
5.2	Struktur der Längsregelung mit Ausgabegrößen zur Aktorikbeeinflussung und Fahreranzeige . . . . .	100
5.3	Experimentalfahrzeug mit Umfeldsensorik: Stereo-Kamerasystem (oben) und Fernbereichsradarsensor (unten) . . . . .	101
5.4	Physikalische Sicht des Gesamtsystems mit getrennten Bussystemen und zentralem Watchdog zur Überwachung . . . . .	102
5.5	Abbildung von Funktionen (logische Sicht) auf Komponenten (physikalische Sicht) . . . . .	103
5.6	Struktur des erzeugten Softwaremodells mit variablen Ein- und Ausgängen zum Einsatz im Fahrzeug und in Simulationen . . . . .	105
5.7	Einfache GUI des Simulators zur Closed-Loop-Simulation des Gesamtsystems . . . . .	106
5.8	Bildschirmkopie der Bibliothek slBNT in Simulink . . . . .	108
5.9	Elternknoten aus der Bibliothek slBNT . . . . .	109
5.10	Unbekannter Zustandsknoten aus der Bibliothek slBNT . . . . .	109
5.11	Kindknoten aus der Bibliothek slBNT . . . . .	110
5.12	Konnektor aus der Bibliothek slBNT zur Verbindung mehrerer Eltern- bzw. Kindknoten . . . . .	111
5.13	Struktur der Bibliothek slBNT für den Aufbau Bayes'scher Netze und zur Inferenzbildung . . . . .	112
5.14	Bayes'sches Netz einer Diebstahlwarnanlage mit slBNT . . . . .	113
5.15	Testfallsammlung von slUnit bestehend aus zwei Testfällen mit interaktiven Bedienelementen und Ergebnisanzeige durch Einfärben der Testfall-Subsysteme . . . . .	114
5.16	Struktur der Bibliothek slUnit zum Aufbau von Testfallsammlungen für Simulink . . . . .	115
5.17	Zusammenhänge der beteiligten Artefakte bei automatisierter Ausführung von slUnit mit detaillierter Ausgabe . . . . .	117
5.18	Testfall für slUnit bei Verwendung aufgezeichneter Daten am Beispiels eines Querführungssystems . . . . .	117
5.19	Sequenzdiagramm zur Automatisierung von slUnit . . . . .	118
5.20	Automatische Aktualisierung der Testfallsammlung zur Vermeidung von Dateninkonsistenz . . . . .	119
5.21	Übersicht zu den verschiedenen Tests zur Bibliothek slBNT . . . . .	120
5.22	Bildschirmkopien einer Testfallsammlung (links), des Testlings (rechts oben) und des ersten Testfall (rechts unten) . . . . .	121
5.23	Bildschirmkopie des HTML-Berichts zu einer Testfallsammlung zum Test von slBNT . . . . .	122
6.1	Aktivitätsdiagramm zur Verarbeitung der Messdaten aus Fahrversuchen . . . . .	127

6.2	Beispielhafter Verlauf der lateralen Ablage innerhalb des Fahrstreifens bei einem Fahrstreifenwechsel (a) und relative Häufigkeit der Präsenz eines Vorderfahrzeugs (b)	128
6.3	Verwendung und Zeitpunkt der Aktivierung des Fahrtrichtungsanzeigers (FRA) relativ zum Fahrstreifenwechsel	128
6.4	Statistische Angaben zur Zeitlücke zum Vorderfahrzeug zum Zeitpunkt des Fahrstreifenwechsels	129
6.5	Tatsächlicher und erkannter Zustand eines Fahrstreifenwechsels sowie Wahrscheinlichkeit des erkannten Zustands	130
6.6	Detektionsleistung des Algorithmus zur Erkennung von Fahrstreifenwechseln (rechts) und Darstellung des wahrscheinlichsten Zustands für jeden Messzeitpunkt (links)	130
6.7	Statistische Angaben zum Zeitpunkt der Detektion eines Fahrstreifenwechsels	131
6.8	Sollbeschleunigung (a) und Fahrzeuggeschwindigkeit (b) mit bzw. ohne Anpassung des Reglerverhaltens; mögliches Szenario: Fahrstreifenwechsel nach Folgefahrt hinter einem Lkw	132
6.9	Sollbeschleunigung und Geschwindigkeit mit bzw. ohne Anpassung des Reglerverhaltens bei Annäherung an ein langsamerer Vorderfahrzeug mit Fahrstreifenwechsel	133
6.10	Sollbeschleunigung (a), Abstand (b), Geschwindigkeit (c) und Phasenraumdarstellung bei Annäherung an ein langsamerer Vorderfahrzeug	134
A.1	Dynamisches Bayes'sches Netz (a), temporäres Netz (b), zum dynamischen Netz äquivalente Struktur (c)	148

# Tabellenverzeichnis

2.1	Zuordnung verschiedener Fahrerassistenzsysteme zu den drei Bahnführungsebenen . . . . .	13
2.2	Übersicht zu referenzierten Arbeiten zur Situationsanalyse . . .	30
3.1	Verwendung von verschiedenen Datenquellen in unterschiedlichen Testumgebungen für Tests des gesamten Fahrerassistenzsystems . . . . .	59
4.1	Bedingte Wahrscheinlichkeiten der Knoten <i>Anruf</i> (a) und <i>Alarm</i> (b): <i>Alarm</i> (al), <i>Anruf</i> (an), <i>Abschleppen</i> (ab), <i>Einbruch</i> (ei) . .	75
4.2	Vollständige gemeinsame Verteilung eines Ereignisses <i>S</i> in Abhängigkeit von drei Variablen ( $Y_1, Y_2, Y_3$ ) . . . . .	79
4.3	Matrix der Übergangswahrscheinlichkeiten $P(S \mid X_1, X_2, X_3)$ .	80
4.4	Übergangswahrscheinlichkeiten der Knoten $Z_1$ (a), $Z_2$ (b), $Z_3$ (c) und A-priori-Wahrscheinlichkeiten des Elternknotens <i>S</i> (d)	81
4.5	Übersicht zu den Vor- und Nachteilen der betrachteten Methoden für eine Situationsanalyse zur Erkennung von Fahrsituationen . . . . .	82
5.1	Übersicht zu den Testfällen des Gesamtsystemtests für die Konfiguration 1 Elternknoten, 1 Kindknoten (2 Zustände pro Knoten)	122
6.1	Statistische Angaben zu Probanden der Fahrversuche . . . . .	126
B.1	Signale der Eingangsschnittstelle . . . . .	150
B.2	Eingangsdaten für Objektsimulation (online und offline) . . . . .	150
B.3	Signale der Ausgangsschnittstelle . . . . .	151



## Anhang A

### Äquivalente Inferenz in dynamischen Bayes'schen Netzen

Anhand eines vereinfachten Beispiels wird hier exemplarisch die Äquivalenz eines dynamischen Bayes'schen Netzes, wie es in dieser Arbeit verwendet wird, und zwei statischen Netzen gezeigt. Dabei sei angenommen das jeder Knoten  $W$  die beiden Zustände  $w$  ( $W = \text{wahr}$ ) und  $\neg w$  ( $W = \text{falsch}$ ) habe.

Für das dynamische Bayes'sche Netz in Abbildung A.1a kann die Wahrscheinlichkeit für den Knoten  $S^{t_i}$  mit einem Normierungsfaktor  $\gamma$  wie folgt ermittelt werden<sup>1</sup> (Russell und Norvig 2004):

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(S^{t_i} | X^t, Z^t) &= \gamma \mathbf{P}(S^{t_i}, X^t, Z^t) \\ &= \gamma \sum_{S^{t_{i-1}}} \mathbf{P}(S^{t_i}, X^{t_i}, X^{t_{i-1}}, Z^{t_i}, Z^{t_{i-1}}, S^{t_{i-1}}) \end{aligned}$$

Das bedeutet hier:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(S^{t_i} | X^t, Z^t) &= \gamma \left\{ \underbrace{\left( \mathbf{P}(S^{t_{i-1}} | X^{t_{i-1}}) \mathbf{P}(Z^{t_{i-1}} | S^{t_{i-1}}) \mathbf{P}(S^{t_i} | X^{t_i}, S^{t_{i-1}}) \right)}_{Q_1} + \right. \\ &\quad \left. \underbrace{\left( \mathbf{P}(\neg S^{t_{i-1}} | X^{t_{i-1}}) \mathbf{P}(Z^{t_{i-1}} | \neg S^{t_{i-1}}) \mathbf{P}(S^{t_i} | X^{t_i}, \neg S^{t_{i-1}}) \right)}_{\bar{Q}_1} \right\} \\ &\quad \mathbf{P}(Z^{t_i} | S^{t_i}) \} \end{aligned} \tag{A.1}$$

Für das temporäres Netz nach Abbildung A.1b gilt für den Knoten  $\hat{S}^{t_{i-1}}$ :

$$\mathbf{P}(\hat{S}^{t_{i-1}} | X^{t_{i-1}}, Z^{t_{i-1}}) = \gamma \left\{ \mathbf{P}(\hat{S}^{t_{i-1}} | X^{t_i}) \mathbf{P}(Z^{t_{i-1}} | \hat{S}^{t_{i-1}}) \right\} \tag{A.2}$$

---

<sup>1</sup>  $X^t = X^{t_i}, X^{t_{i-1}}$  und  $Z^t = Z^{t_i}, Z^{t_{i-1}}$

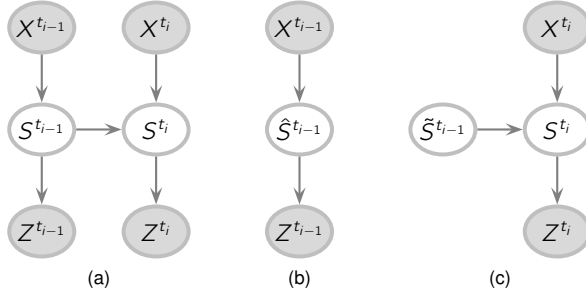


Abbildung A.1: Dynamisches Bayes'sches Netz (a), temporäres Netz (b), zum dynamischen Netz äquivalente Struktur (c)

Für das statische Netz nach Abbildung A.1c gilt bei unbeobachtetem Knoten  $\tilde{S}^{t_{i-1}}$ :

$$\mathbf{P}(S^{t_i} | X^{t_i}, Z^{t_i}) = \gamma \left\{ \left( \mathbf{P}(S^{t_i} | X^{t_i}, \tilde{S}^{t_{i-1}}) \mathbf{P}(\tilde{S}^{t_{i-1}}) + \mathbf{P}(S^{t_i} | X^{t_i}, \neg \tilde{S}^{t_{i-1}}) \mathbf{P}(\neg \tilde{S}^{t_{i-1}}) \right) \mathbf{P}(Z^{t_i} | S^{t_i}) \right\} \quad (\text{A.3})$$

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit soll gelten:

$$\mathbf{P}(\hat{S}^{t_{i-1}} | X^{t_i}) = \mathbf{P}(S^{t_{i-1}} | X^{t_i}) \quad (\text{A.4})$$

$$\mathbf{P}(Z^{t_{i-1}} | \hat{S}^{t_{i-1}}) = \mathbf{P}(Z^{t_{i-1}} | S^{t_{i-1}}) \quad (\text{A.5})$$

$$\mathbf{P}(S^{t_i} | \tilde{S}^{t_{i-1}}, X^{t_i}) = \mathbf{P}(S^{t_i} | S^{t_{i-1}}, X^{t_i}) \quad (\text{A.6})$$

Wenn die A-priori-Wahrscheinlichkeiten  $P(\tilde{S}^{t_{i-1}})$  und  $P(\neg \tilde{S}^{t_{i-1}})$  aus der Berechnung des Netzes nach Abbildung A.1b unter Berücksichtigung der Gleichungen (A.4) bis (A.6) übernommen werden, gilt:

$$P(\tilde{S}^{t_{i-1}}) = \mathbf{P}(S^{t_{i-1}} | X^{t_{i-1}}) \mathbf{P}(Z^{t_{i-1}} | S^{t_{i-1}}) \quad (\text{A.7})$$

$$P(\neg \tilde{S}^{t_{i-1}}) = \mathbf{P}(\neg S^{t_{i-1}} | X^{t_{i-1}}) \mathbf{P}(Z^{t_{i-1}} | \neg S^{t_{i-1}}) \quad (\text{A.8})$$

Nun erkennt man, dass  $Q_1$  und  $\bar{Q}_1$  den A-priori-Wahrscheinlichkeiten  $P(\tilde{S}^{t_{i-1}})$  bzw.  $P(\neg \tilde{S}^{t_{i-1}})$  entsprechen. Das dynamische Bayes'sche Netz nach Abbildung A.1a kann somit auf zwei statische Netze (Abbildungen A.1b und A.1c) zurückgeführt werden.



## Anhang B

# Schnittstellenbeschreibung des multifunktionalen Längsregelmodells

### B.1 Eingang

<b>Fahrzeugdaten</b>	
Geschwindigkeit	m/s
Beschleunigung x-Richtung	m/s <sup>2</sup>
Beschleunigung y-Richtung	m/s <sup>2</sup>
Giergeschwindigkeit	°/s
<b>Objektdaten</b>	
Abstand x-Richtung	m
Abstand y-Richtung	m
Geschwindigkeit x-Richtung	m/s
Geschwindigkeit y-Richtung	m/s
Breite	m
<b>Fahrstreifendaten</b>	
Fahrstreifenbreite	m
Markierungsart links	-
Markierungsart rechts	-
Fahrstreifenkrümmung	1/m
Ablage	m
Gierwinkelfehler	°
<b>Fahrereingaben</b>	
Fahrpedalwert	%
Fahrerbremsung	-

Lenkradwinkel	◦
Fahrtrichtungsanzeiger links	-
Fahrtrichtungsanzeiger rechts	-
ACC-Bedienhebel: Set	-
ACC-Bedienhebel: Cancel	-
ACC-Bedienhebel: V+	-
ACC-Bedienhebel: V–	-
ACC-Bedienhebel: Dist+	-
ACC-Bedienhebel: Dist–	-

#### Weitere Eingaben

Sensor-ID ACC	-
Modus (Simulation/Online)	-

Tabelle B.1: Signale der Eingangsschnittstelle

Die Fahrpedalbetätigung sowie das Signal der Fahrerbremsung werden in der Simulation durch die Vorgabe einer Fahrzeuglängsbeschleunigung ersetzt.

#### Objektdaten

Initialabstand x-Richtung	m
Initialabstand y-Richtung	m
Geschwindigkeit x-Richtung	m/s
Beschleunigung x-Richtung	m/s <sup>2</sup>
Objektreset	-

Tabelle B.2: Eingangsdaten für Objektsimulation (online und offline)

## B.2 Ausgang

<b>Ansteuerbotschaften</b>	
ACC-Zustandsindex	-
Freigabe Sollbeschleunigung	-
Wunschgeschwindigkeit	km/h
Gesetzte Zeitlücke (Index)	-
Gemessene Zeitlücke (Index)	-
Anhaltewunsch	-
Fahrerhinweis	-
Fahrerübernahmeaufforderung	-
Anzeigepriorität	-
Sollbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
Botschaftszähler	-
Prüfsumme	-
<b>Situationsanalyse</b>	
Wahrscheinlichkeit Zustand 1	-
Wahrscheinlichkeit Zustand 2	-
Wahrscheinlichkeit Zustand 3	-

Tabelle B.3: Signale der Ausgangsschnittstelle



# Literaturverzeichnis

- Abendroth 2001** ABENDROTH, Bettina ; LANDAU, Kurt (Hrsg.): *Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen*. Stuttgart : ergonomia Verlag, 2001 (Bericht aus dem Institut für Arbeitswissenschaft der Technische Universität Darmstadt, Schriftenreihe Ergonomie)
- AHSRA 1996** : *Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association (AHSRA)*. 1996. – URL <http://www.ahsra.or.jp>. – Zugriffsdatum: 07.01.2008
- AKTIV 2006** : *Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr (AKTIV)*. 2006. – URL <http://www.aktiv-online.org>. – Zugriffsdatum: 17.06.2008
- Balzert 2000** BALZERT, Helmut: *Lehrbuch der Software-Technik – Software-Entwicklung*. Spektrum Akademischer Verlag, 2000
- Basarke u. a. 2007** BASARKE, Christian ; BERGER, Christian ; RUMPE, Bernhard: Software & Systems Engineering Process and Tools for the Development of Autonomous Driving Intelligence. In: *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication (JACIC)* 4 (2007), S. 1158–1174
- Bayes 1763** BAYES, Thomas: An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 53 (1763), S. 370–418
- Beck 1989** BECK, Kent: *Simple Smalltalk Testing: With Patterns*. 1989
- Beck 2002** BECK, Kent: *Test-Driven Development: By Example*. Addison-Wesley Professional, 2002
- Becker 2006** BECKER, Jan: Fusion von Sensordaten zur Umfeldwahrnehmung für Fahrerassistenzsysteme – Eine Übersicht. In: ([Beyerer u. a. 2006](#)), S. 207–221
- Becker und Sonntag 1993** BECKER, Stefan ; SONNTAG, Jörg: Autonomous Intelligent Cruise Control – Pilotstudie der Daimler-Benz und Opel

Demonstratoren / TÜV Rheinland. 1993. – Forschungsbericht

**Behringer 1997** BEHRINGER, Reinhold: *Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurverlaufes durch Rechnersehen für ein autonomes Straßenfahrzeug*. Düsseldorf : VDI Verlag, 1997 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Nr. 310)

**Beierle und Kern-Isberner 2008** BEIERLE, Christoph ; KERN-ISBERNER, Gabriele: *Methoden wissensbasierter Systeme – Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*. Vieweg+Teubner, 2008

**Berger 2010** BERGER, Christian: *Automating Acceptance Tests for Sensor- and Actuator-based Systems on the Example of Autonomous Vehicles*, RWTH Aachen, Dissertation, 2010

**Beyerer u. a. 2006** BEYERER, Jürgen (Hrsg.) ; PUENTE LÉON, Fernando (Hrsg.) ; SOMMER, Klaus-Dieter (Hrsg.): *Informationsfusion in der Mess- und Sensortechnik*. Universitätsverlag Karlsruhe, 2006

**Binder 1999** BINDER, Robert V.: *Testing Object-oriented Systems: Models, Patterns and Tools*. Addison-Wesley Professional, 1999

**Blaschke u. a. 2007** BLASCHKE, Christoph ; SCHMITT, Josef ; FÄRBER, Berthold: Fahrmanöver-Prädiktion über CAN-Bus Daten. In: *VDI-Berichte* 2015 (2007), S. 165–177

**Bock u. a. 2008** BOCK, Thomas ; MAURER, Markus ; VAN MEEL, Franciscus ; MÜLLER, Thomas: Vehicle in the Loop – Ein innovativer Ansatz zur Kopplung virtueller mit realer Erprobung. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 1 (2008)

**Braess 2003** BRAESS, Hans-Hermann: Was hat Prometheus gebracht? In: BARGENDE, Michael (Hrsg.) ; WIEDEMANN, Jochen (Hrsg.): *Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren: 5. Internationales Stuttgarter Symposium*. Renningen : expert-Verlag, 2003

**Braess und Seiffert 2007** BRAESS, Hans-Hermann (Hrsg.) ; SEIFFERT, Ulrich (Hrsg.): *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2007 (ATZ-MTZ Fachbuch)

**Brandstätter u. a. 2003** BRANDSTÄTER, Martin ; BAUER, Günter ; PRESTL, Willibald: ACC-Funktionsoptimierung durch Nutzung von Navigations-Daten. In: *11. Internationaler VDI-Kongress „Elektronik im Kraftfahrzeug“ in Baden-Baden*. Düsseldorf : VDI Verlag, 2003

**Brandstätter u. a. 2004** BRANDSTÄTER, Martin ; BAUER, Günter ; PRESTL,

Willibald: Mit Weitblick immer einen Schritt voraus: Fahrerassistenzsysteme. In: *Sonderausgabe der Automobiltechnischen Zeitschrift* 106 (2004), S. 96–101

**Breuer 2004** BREUER, Karsten ; WALLENTOWITZ, Henning (Hrsg.): *Verkehrsflusssimulation zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen*. Aachen : Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen, 2004

**Brown 2005** BROWN, Ivan D.: *Review of the Looked But Failed to See Accident Causation Factor*. Department for Transport United Kingdom, 2005

**Broy u. a. 2007** BROY, Manfred ; PRETSCHNER, Alexander ; KRÜGER, Ingrid H. ; STAUNER, Thomas: *Software Engineering for Automotive Systems: A Roadmap*. In: *Future of Software Engineering* (2007)

**Brusque 2008** BRUSQUE, Corinne (Hrsg.) ; INRETS (Veranst.): *HUMANIST – European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*. Lyon, Frankreich, 2008

**Bubb 2002** BUBB, Heiner: Der Fahrprozess – Informationsverarbeitung durch den Fahrer. In: *Tagungsband Technischer Kongress 2002*. Frankfurt am Main, 2002, S. 19–38

**Buschmann u. a. 1996** BUSCHMANN, Frank ; MEUNIER, Regine ; ROHNERT, Hans ; SOMMERLAD, Peter: *Pattern-Oriented Software Architecture Volume 1: A System of Patterns*. John Wiley & Sons, 1996

**Charniak 1991** CHARNIAK, Eugene: Bayesian Networks without Tears. In: *AI Magazine* 12 (1991), S. 50–63

**Cheng und Trivedi 2006** CHENG, Shinko Y. ; TRIVEDI, Mohan M.: Turn-Intent Analysis Using Body Pose for Intelligent Driver Assistance. In: *IEEE Pervasive Computing* Bd. 5, 2006

**Coelingh u. a. 2006** COELINGH, Erik ; LIND, Henrik ; BIRK, Wolfgang ; WETTERBERG, Daniel: Collision warning with auto brake. In: *FISITA World Automotive Congress*, 2006

**Dagli 2005** DAGLI, Ismail: *Erkennung von Einscherer-Situationen für Abstandsregeltempomaten*, Universität Tübingen, Dissertation, 2005

**Decision Systems Laboratory 2007** DECISION SYSTEMS LABORATORY: *SMILE – Structural Modeling, Inference, and Learning Engine & GeNIe – Graphical Network Interface*. 2007. – URL <http://genie.sis.pitt.edu/>. – Zugriffsdatum: 21.07.2007

**Dempster 1968** DEMPSTER, Arthur P.: A Generalization of Bayesian Infe-

- rence. In: *Journal of the Royal Statistical Society* 30 (1968), S. 205–247
- Deutsche Bahn 2008** DEUTSCHE BAHN: *Deutsche Bahn Autozug*. 2008.  
– URL <http://www.dbautozug.de>. – Zugriffsdatum: 25.08.2008
- Dickmanns 2005** DICKMANNS, Ernst D.: Vision: Von Assistenz zum Autonomem Fahren. In: (Maurer und Stiller 2005)
- Dietmayer 2006** DIETMAYER, Klaus: Evidenztheorie: Ein Vergleich zwischen Bayes- und Dempster-Shafer-Methoden. In: (Beyerer u. a. 2006), S. 39–49
- Dohmke und Gollee 2007** DOHMKE, Thomas ; GOLLEE, Henrik: Test-Driven Development of a PID Controller. In: *IEEE Software* 24 (2007), Nr. 3, S. 44–50
- Donges 1982** DONGES, Edmund: Aspekt der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: *Automobil-Industrie* 2 (1982), S. 183–190
- Donges 1992** DONGES, Edmund: *Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur aktiven Sicherheit im Straßenverkehr*. VDI Verlag, 1992 (Anlage zum VDI-Bericht Nr. 948)
- dSPACE 2009** dSPACE: *Rapid Prototyping: Autobox and ControlDesk*. 2009. – URL <http://www.dspace.de>. – Zugriffsdatum: 19.01.2009
- Du u. a. 2007** DU, Yu ; GOLDAU, Arne ; WOHLBERG, Stefan: Algorithmen zur Fahrspurprädiktion für Fahrerassistenzsysteme am Beispiel Adaptive Cruise Control. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 109 (2007), Nr. 12, S. 1166–1175
- ECE-R79 2006** : *ECE-Regelung R 79: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage, Revision 2*. 2006
- Ehmanns u. a. 2003** EHMANN, Dirk ; ZAHN, Peter ; SPANNHEIMER, Helmut ; FREYMAN, Raymond: Integrierte Längs- und Querverführung – Ein neues Konzept für Fahrerassistenzsysteme. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 105 (2003), S. 346–352
- Eigel 2010** EIGEL, Thomas: *Integrierte Längs- und Querverführung von Personenkraftwagen mittels Sliding-Mode-Regelung*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2010
- Elkan 1997** ELKAN, Charles: Boosting and naive Bayesian learning / University of California, San Diego, Kalifornien. 1997 (CS97-557). – Forschungsbericht



- euroFOT 2010** EUROFOT: *European Field Operational Test*. 2010. – URL <http://www.eurofot-ip.eu>. – Zugriffsdatum: 21.07.2010
- Fancher u. a. 1998** FANCHER, P. ; ERVIN, R. ; SAYER, J. ; HAGAN, M. ; BOGARD, S. ; BAREKET, Z. ; MEFFORD, M. ; HAUGEN, J.: *Intelligent Cruise Control Field Operational Test - Final Report / University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI)*. Michigan, 1998. – Forschungsbericht
- Fastenmeier 1995a** FASTENMEIER, Wolfgang (Hrsg.): *Mensch – Fahrzeug – Umwelt*. Bd. 33: *Autofahrer und Verkehrssituation*. Köln, Bonn : Verlag TÜV Rheinland, Deutscher Psychologen-Verlag, 1995
- Fastenmeier 1995b** FASTENMEIER, Wolfgang: Die Verkehrssituation als Analyseseinheit im Verkehrssystem. Siehe ([Fastenmeier 1995a](#)), S. 27–78
- Fastenmeier u. a. 1995** FASTENMEIER, Wolfgang ; STADLER, Peter ; LERNER, Georg: Situationsbezogene Fahrerunterstützung durch AICC (Autonomous Intelligent Cruise Control). In: ([Fastenmeier 1995a](#)), S. 181–197
- Fecher 2005** FECHER, Norbert: *Analyse des stationären Folgeverhaltens von PKW-Fahrzeugführern unter Berücksichtigung von Nässe und einhergehender Sichtbehinderung*. Düsseldorf : VDI Verlag, 2005 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Nr. 604)
- Fenton und Mayhan 1991** FENTON, Robert E. ; MAYHAN, Robert J.: Automated Highway Studies at The Ohio State University – An Overview. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* Bd. 40, 1991
- Flemisch 2004** FLEMISCH, Frank O.: Wie könnte es über Assistenzsysteme hinaus weitergehen? In: ([VDI FAS 2004](#))
- Freyer u. a. 2007** FREYER, Jörn ; DEML, Barbara ; MAURER, Markus ; FÄRBER, Berthold: ACC with enhanced situation awareness to reduce behavior adaptations in lane change situations. In: *Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Istanbul, Turkey, 2007
- Färber 2005** FÄRBER, Bertold: Erhöhter Fahrernutzen durch Integration von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen. In: ([Maurer und Stiller 2005](#))
- Gamma u. a. 1994** GAMMA, Erich ; HELM, Richard ; JOHNSON, Ralph ; VLISSIDES, John M.: *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley Professional, 1994
- Gehrig 2000** GEHRIG, Stefan K.: *Design, Simulation and Implementation*

*of a Vision-Based Vehicle-Following System*, Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, Dissertation, 2000

**Gerdes 2006a** GERDES, Arati: Automatic Maneuver Recognition in the Automobile: the Fusion of Uncertain Sensor Values using Bayesian Models. In: *3<sup>rd</sup> International Workshop on Intelligent Transportation*, 2006, S. 129–133

**Gerdes 2006b** GERDES, Arati: Driving Manoeuvre Recognition. In: ERTICO; ITS EUROPE (Hrsg.): *13<sup>th</sup> World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*, 2006

**Gerdes 2006c** GERDES, Arati: From Data to Information: Probabilistic Methods for Dealing with Sensor Inaccuracy. In: *VDI-Berichte 1960*, VDI Verlag, 2006, S. 543–552

**Gesamtverband für Verkehr Braunschweig e.V. 2008** GESAMTVERBAND FÜR VERKEHR BRAUNSCHWEIG E.V. (Hrsg.): *9. Braunschweiger Symposium – Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig, 2008

**GIDAS 2010** GIDAS: *German In-Depth Accident Study*. 2010. – URL <http://www.gidas.org>. – Zugriffsdatum: 17.06.2010

**G.I.N. 2010** G.I.N. GESELLSCHAFT FÜR INDUSTRIELLE NETZWERKE GMBH: *CANlog 3*. 2010. – URL <http://www.gin.de>. – Zugriffsdatum: 02.02.2010

**Gründl 2005** GRÜNDL, Martin: *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*, Universität Regensburg, Dissertation, 2005

**Gwehenberger u. a. 2008** GWEHENBERGER, Johann ; DASCHNER, Dieter ; KUBITZKI, Jörg: Chancen und Risiken mit Fahrerassistenzsystemen – Aktuelle Erkenntnisse der AZT Unfallforschung. Siehe ([Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München 2008](#))

**Haller 2001** HALLER, Rudolf: Fahrerassistenz versus Fahrer-Bevormundung: Wie erreicht man, dass der Fahrer Herr der Situation bleibt? In: JÜRGENSOHN, Thomas (Hrsg.) ; TIMPE, Klaus-Peter (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 2001

**Hamberger 1999** HAMBERGER, Werner: *Verfahren zur Ermittlung und Anwendung vom prädiktiven Streckendaten für Assistenzsysteme in der Fahr-*

zeugführung. Düsseldorf : VDI Verlag, 1999 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Nr. 371)

**Hamill 2004** HAMILL, Paul: *Unit Test Frameworks*. Sebastopol, Kalifornien : O'Reilly Media, 2004

**Hanmer 2007** HANMER, Robert S.: *Patterns for Fault Tolerant Software*. John Wiley & Sons, 2007 (Software Design Patterns)

**Happe und Lütz 2008** HAPPE, Johannes ; LÜTZ, Michael: Fahrerassistenz: Trends in der Fahrerakzeptanz – Kundennutzen, Bekanntheitsgrad und Kaufbereitschaft. Siehe ([Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München 2008](#))

**Heisele 1998** HEISELE, Bernd: *Objektdetektion in Straßenverkehrsszenen durch Auswertung von Farbbildfolgen*. Düsseldorf : VDI Verlag, 1998 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 10, Nr. 567)

**Henning u. a. 2008** HENNING, Matthias ; GEORGEON, Olivier ; WYNN, Tony ; KREMS, Josef: Modelling driver behaviour in order to infer the intention to change lanes. In: ([Brusque 2008](#)), S. 113–120

**Hoffmann und Winner 2009** HOFFMANN, Jens ; WINNER, Herman: EVITA – Das Prüfverfahren zur Beurteilung von Antikollisionssystemen. In: WINNER, Hermann (Hrsg.) ; HAKULI, Stephan (Hrsg.) ; WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner, 2009, S. 69–75

**Hofmeyer 1999** HOFMEYER, Andreas: *Verfahren und Anordnung zur Bestimmung eines Regelobjektes*. 1999. – Schutzrecht DE 19736966

**Horstmann 2005** HORSTMANN, Marc: *Verflechtung von Test und Entwurf für eine verlässliche Entwicklung eingebetteter Systeme im Automobilbereich*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2005

**INTERSAFE-2 2010** : *INTERSAFE-2*. 2010. – URL <http://www.intersafe-2.eu>. – Zugriffsdatum: 16.08.2010

**INVENT STA 2005** INVENT STA: *INVENT – Stauassistent (STA) Ergebnisbericht*. 2005

**Kanal 1972** KANAL, Laveen N.: Interactive pattern analysis and classification systems: A survey and commentary. In: *Proceedings of the IEEE* 60 (1972), S. 1200–1215

**Kesting u. a. 2005** KESTING, Arne ; TREIBER, Martin ; SCHÖNHOF, Martin ; KRANKE, Florian ; HELBING, Dirk: Jam-Avoiding Adaptive Cruise Control (ACC) and its Impact on Traffic Dynamics. In: *Traffic and Granular Flow*

(2005), S. 633–643

**Klanner u. a. 2008** KLANNER, Felix ; THOMA, Stephan ; WINNER, Hermann: Fahrerhaltensuntersuchungen und Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für die Kreuzungsassistentz. Siehe ([Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München 2008](#))

**Knoll 2005** KNOLL, Peter M.: Prädiktive Fahrerassistenz: vom Komfortsystem zur aktiven Unfallvermeidung. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 107 (2005), S. 230–237

**Koks und Challa 2005** KOKS, Don ; CHALLA, Subhash: An Introduction to Bayesian and Dempster-Shafer Data Fusion / Australian Department of Defence. Sydney, Australien, 2005. – Forschungsbericht

**Kompass und Huber 2006** KOMPASS, Klaus ; HUBER, Werner: Advanced Driver Assistance – How Far Should They Go? In: *FISITA World Automotive Congress*, 2006

**Kopf 2005** KOPF, Matthias: Was nützt es dem Fahrer, wenn Fahrerinformation- und -assistenzsysteme etwas über ihn wissen? In: ([Maurer und Stiller 2005](#))

**Kruchten 1995** KRUCHTEN, Philippe: Architectural Blueprints – The „4+1“ View Model of Software Architecture. In: *IEEE Software* 12 (1995), S. 42–50

**Kushitani 2008** KUSHITANI, Saeko: *Toyota's Safety System Alerts Dozing Driver*. 2008. – URL [http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS\\_EN/20080123/146097/](http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20080123/146097/). – Zugriffsdatum: 29.01.2008

**Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München 2008** Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (Veranst.): *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. 2008

**Linder u. a. 2007** LINDER, Astrid ; KIRCHER, Albert ; VADEBY, Anna ; NYGÅRDHS, Sara: Intelligent Transport Systems (ITS) in passenger cars and methods for assessment of traffic safety impact / VTI – Swedish National Road and Transport Research Institute. 2007. – Forschungsbericht

**Ludmann 1995** LUDMANN, Jens: Der Intelligente Tempomat – Eine Analyse mit dem Simulationsprogramm PELOPS. In: *5. Aachener Kolloquium: Fahrzeug- und Motorentechnik* Institut für Kraftfahrwesen, RWTH Aachen (Veranst.), 1995

**Luger 2005** LUGER, George F.: *Artificial Intelligence – Structures and Stra-*

*tegies for complex problem solving*. 5. Boston, Massachusetts : Addison-Wesley, 2005

**MAAB 2001** MATHWORKS AUTOMOTIVE ADVISORY BOARD (MAAB): *MAAB Guide, „Controller Style Guidelines for Production Intent Using MATLAB, Simulink and Stateflow“, Version 1.00*. 2001

**Mathworks 2009** THE MATHWORKS: *Simulink*. 2009. – URL <http://www.mathworks.com/products/simulink/>. – Zugriffsdatum: 19.01.2009

**Maurer und Stiller 2005** MAURER, Markus (Hrsg.) ; STILLER, Christoph (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2005

**Mayr 2001** MAYR, Robert: *Regelungsstrategien für automatische Fahrzeugführung – Längs- und Querregelung, Spurwechsel- und Überholmanöver*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2001

**Mayser u. a. 2006** MAYSER, Christoph ; KOMPASS, Klaus ; KAGERER, Walter ; NAAB, Karl: Interactive cruise control - cruising in cooperation with an assistance system. In: *FISITA World Automotive Congress*, 2006

**McCall und Trivedi 2007** MCCALL, Joel C. ; TRIVEDI, Mohan M.: Breaking Behaviour and Situation Aware Brake Assistance for Intelligent Vehicles. In: *Proceedings of the IEEE* Bd. 95, 2007, S. 374–387

**McCall u. a. 2007** MCCALL, Joel C. ; WIPF, David P. ; TRIVEDI, Mohan M. ; RAO, Bhaskar D.: Lane Change Intent Analysis Using Robust Operators and Sparse Bayesian Learning. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* Bd. 8, 2007

**Meinecke 2001** MEINECKE, Marc-Michael: *Zum optimierten Sendesignal-entwurf*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, 2001

**Mende 1999** MENDE, Ralph: *Radarsysteme zur automatischen Abstandsregelung in Automobilen*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 1999

**Meszaros 2007** MESZAROS, Gerard: *xUnit Test Patterns: Refactoring Test Code*. Addison-Wesley Professional, 2007

**MISRA-C 2004** MOTOR INDUSTRY RESEARCH ASSOCIATION (MIRA): *MISRA-C: Guidelines for the Use of the C Language in Critical Systems*. 2004. – Motor Industry Software Reliability Association (MISRA)

**MISRA-C++ 2008** MOTOR INDUSTRY RESEARCH ASSOCIATION (MIRA): *MISRA-C++: Guidelines for the Use of the C++ Language in Critical Sys-*

- tems. 2008. – Motor Industry Software Reliability Association (MISRA)
- Mitschke und Wallentowitz 2004** MITSCHKE, Manfred ; WALLENTOWITZ, Henning: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer-Verlag, 2004
- Moeslund und Granum 2001** MOESLUND, Thomas B. ; GRANUM, Erik: A Survey of Computer Vision-Based Human Motion Capture. In: *Computer Vision and Image Understanding* Bd. 81, 2001, S. 231–268
- Murphy 2002a** MURPHY, Kevin P.: *Bayes Net Toolbox for Matlab*. 2002. – URL <http://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Software/BNT/bnt.html>. – Zugriffsdatum: 09.10.2008
- Murphy 2002b** MURPHY, Kevin P.: *Dynamic Bayesian Networks: Representation, Inference and Learning*, University of California, Berkeley, Kalifornien, Dissertation, 2002
- Naab u. a. 2000** NAAB, Karl ; UHLER, Werner ; JUNG, Christoph ; BAUM, Dietmar ; SCHNEIDER, Arthur: *MOTIV – Abstands- und Geschwindigkeitsregelung: Abschlussbericht einer Machbarkeitsstudie zu „ACC im Ballungsraum“*. 2000
- Nagel und Arens 2005** NAGEL, H.-H. ; ARENS, M.: Innervation des Automobils und Formale Logik. In: ([Maurer und Stiller 2005](#))
- Nauck u. a. 1994** NAUCK, Detlef ; KLAUWONN, Frank ; KRUSE, Rudolf: *Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme – Grundlagen des Konnektionismus, Neuronaler Fuzzy-Systeme und der Kopplung mit wissensbasierten Methoden*. Wiesbaden : Vieweg Verlag, 1994
- Neunzig 2004** NEUNZIG, Dirk: Fahrerassistenz auf dem Weg zur aktiven Unfallvermeidung. In: *Seminar der Gesellschaft für Unfallforschung IHK Köln*, 2004
- Nirschl u. a. 1999** NIRSCHL, Günter ; BLUM, Ernst-Josef ; KOPF, Matthias: Untersuchung zur Benutzbarkeit und Akzeptanz eines ACC-Fahrerassistenzsystems / Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung, IITB Mitteilungen. 1999. – Forschungsbericht
- Oberschätzl und Zollner 2008** OBERSCHÄTZL, Markus ; ZOLLNER, Florian: Einsatz einer kontinuierlichen Kundennutzenanalyse zur bedarfsgeordneten Weiterentwicklung der Fahrerassistenz im Automobil. In: ([Gesamtverband für Verkehr Braunschweig e.V. 2008](#))
- Olsen 2003** OLSEN, Erik Charles B.: *Modeling Slow Lead Vehicle Lane Changing*, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, Dissertation, 2003

- OMG DDS 2007** THE OBJECT MANAGEMENT GROUP (OMG): *Data Distribution Service for Real-time Systems – Specification*. – URL <http://www.omg.org/spec/DDS/>
- OMG UML 2009** THE OBJECT MANAGEMENT GROUP (OMG): *Unified Modeling Language – Specification*. – URL <http://www.omg.org/spec/UML/>. – Zugriffsdatum: 19.01.2009
- Paetzold 2000** PAETZOLD, Frank: *Interpretation of Visually Sensed Urban Environment for a Self-Driving Car*, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2000
- PATH 1986** : *Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)*. 1986. – URL <http://www.path.berkeley.edu/>. – Zugriffsdatum: 14.06.2007
- Pearl 1998** PEARL, Judea: *Graphs, Causality, and Structural Equation Models* / University of California, Kalifornien. California, USA, 1998 (980004). – Forschungsbericht. – 44 S
- Pellkofer 2003** PELLKOEFER, Martin: *Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung*. Neubiberg, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Dissertation, 2003
- Prestl und Proemm 2003** PRESTL, Willibald ; PROEMM, Uwe: *ACC-Fahrspurprädiktionsbreitenadaption abhängig von Navigationssystemdaten und Objektdaten*. 2003. – Schutzrecht EP 1318491 B1
- Reichart und Haller 1995** REICHART, Günter ; HALLER, Rudolf: Mehr aktive Sicherheit durch neue Systeme für Fahrzeug und Straßenverkehr. In: ([Fastenmeier 1995a](#)), Kap. 8, S. 199–215
- Rojas 1993** ROJAS, Raúl: *Theorie der neuronalen Netze – Eine systematische Einführung*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 1993
- Rumpe 2004** RUMPE, Bernhard: *Agile Modellierung mit UML*. Springer-Verlag, 2004
- Rumpe u. a. 2006** RUMPE, Bernhard ; BERGER, Christian ; KRAHN, Holger: Softwaretechnische Absicherung intelligenter Systeme im Fahrzeug. In: *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme – 22. VDI/VW-Gemeinschaftstagung*. Wolfsburg : VDI Verlag, 2006
- Russell und Norvig 2004** RUSSELL, Stuart ; NORVIG, Peter: *Künstliche Intelligenz - Ein moderner Ansatz*. 2. München : Pearson Education, 2004
- Rösler 2008** RÖSLER, Katja A.: *Wechselwirkende Autofahrer: Ein Mikro-*

*verkehrsmodell auf Basis handlungsplanender, interagierender Fahrermodelle.* Shaker, 2008

**Saeger und Landsiedel 1998** SAEGER, Peter ; LANDSIEDEL, Thomas: *Method and device for a look ahead determination of a drive curve of a motor vehicle.* 1998. – Schutzrecht EP 0849109

**SAFESPOT 2010** : *SAFESPOT.* 2010. – URL <http://www.safespot-eu.org>. – Zugriffsdatum: 06.09.2010

**Sato und Akamatsu 2008** SATO, Toshihisa ; AKAMATSU, Motoyuki: Analysis and Modelling of Driver Preparatory Behaviour Before Turning at Intersections. In: ([Brusque 2008](#))

**Schick u. a. 2007** SCHICK, Bernhard ; BÜTTNER, Rolf ; BALTRUSCHAT, Klaus ; MEIER, Günther: Bewertung der Funktion und Güte von Fahrerassistenzsystemen bei aktivem Bremsengriff. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 109 (2007), S. 414–425

**Schnieder 1999** SCHNIEDER, Eckehard: *Methoden der Automatisierung – Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme.* Braunschweig, Wiesbaden : Vieweg, 1999

**Schnieder 2007** SCHNIEDER, Eckehard (Hrsg.): *Verkehrslleittechnik – Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs.* Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2007

**Schraut 2000** SCHRAUT, Michael: *Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen,* Technische Universität München, Dissertation, 2000

**Schroven u. a. 2009** SCHROVEN, Frank ; BERESNEV, Alexej ; RUMPE, Bernhard: Automated Testing of Graphical Models in Heterogeneous Test Environments. In: *5<sup>th</sup> International Workshop on Intelligent Transportation* Technische Universität Hamburg-Harburg (Veranst.), 2009

**Schroven und Giebel 2008** SCHROVEN, Frank ; GIEBEL, Tobias: Fahrerintentionserkennung für Fahrerassistenzsysteme. In: *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme – 24. VDI/VW-Gemeinschaftstagung.* Wolfsburg : VDI Verlag, 2008

**Schäuffele und Zurawka 2006** SCHÄUFFELE, Jörg ; ZURAWKA, Thomas: *Automotive Software Engineering: Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen.* Vieweg, 2006

**Schöning u. a. 2004** SCHÖNING, Volkmar ; RUCHATZ, Thomas ; BARTELS,



- Arne ; WEHNER, Udo: Fahrerassistenzsysteme für die Golfklasse. In: (VDI FAS 2004)
- Schöning u. a. 2006** SCHÖNING, V. ; KATZWINKEL, R. ; WUTTKE, U. ; SCHWITTERS, F. ; ROHLFS, M. ; SCHULER, T.: Der Parklenkassistent "Park Assist" von Volkswagen. In: *Tagungsband zur 22. Internationale VDI/VW-Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. Wolfsburg, 2006
- Seraphin 1994** SERAPHIN, Marco: *Neuronale Netze und Fuzzy-Logik – Verknüpfung der Verfahren, Anwendungen, Vor- und Nachteile, Simulationsprogramm*. München : Franzis Verlag, 1994
- Shafer 1976** SHAFER, Glenn: *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, 1976
- Siedersberger 2003** SIEDERSBERGER, Karl-Heinz: *Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-)autonomen Fahrzeugen*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2003
- Sommerville 2004** SOMMERVILLE, Ian: *Software Engineering, 7. Auflage*. Harlow, England : Pearson Education Limited, 2004
- Spiegel Insitut Mannheim 2005** SPIEGEL INSITUT MANNHEIM: *ACC-Fahrclinic*. 2005. – Probandenpool Volkswagen AG
- Sprinkle u. a. 2009** SPRINKLE, Jonathan ; EKLUND, J. M. ; GONZALEZ, Humberto ; GRÖTLI, Esten I. ; UPCROFT, Ben ; MAKARENKO, Alex ; UTHER, Will ; MOSER, Michael ; FITCH, Robert ; DURRANT-WHYTE, Hugh ; SASTRY, S. S.: Model-based design: a report from the trenches of the DARPA Urban Challenge. In: *Software and Systems Modeling* 8 (2009), Nr. 4, S. 551–566
- Statistisches Bundesamt 2009** STATISTISCHES BUNDESAMT: Verkehr aktuell / Fachserie 8 Reihe 1.1. Wiesbaden, 2009. – Forschungsbericht
- Steiner u. a. 2005** STEINER, Manfred ; BAUMANN, Matthias ; REGENSBURGER, Uwe ; SCHMIDT, Volker ; HÄMMERLING, Carsten ; SEEKIRCHER, Jürgen ; REICHMANN, Matthias ; KIESEWETTER, Wolfgang: Fahrdynamikregelsystem und Assistenzsysteme. In: *Sonderausgabe der Automobiltechnischen Zeitschrift* 107 (2005), S. 88–99
- Steinle u. a. 2006** STEINLE, Joachim ; HOHMANN, Sören ; KOPF, Matthias ; BRANDSTÄTER, Martin ; PFEIFFER, Andreas ; FARID, Nima: Keeping the focus on the driver: the BMW approach to driver assistance and active safety systems that interact with vehicle dynamics. In: *FISITA World Automotive Congress*, 2006

- Strassberger 2008** STRASSBERGER, Markus: Prädiktive Situationsanalyse auf Basis verteilter Fahrzeuginformationen. Siehe (Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München 2008)
- Stämpfle und Branz 2008** STÄMPFLE, Martin ; BRANZ, Wolfgang: Kollisionsvermeidung im Längsverkehr. Siehe (Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München 2008)
- Tsugawa und Fujii 1991** TSUGAWA, N. ; FUJII, H.: Super smart vehicle system – Its concept and preliminary works. In: *Vehicle Navigation and Information Systems Conference* Bd. 2, 1991, S. 269–277
- Tversky und Kahnemann 1982** TVERSKY, A. ; KAHNEMANN, D.: Causal schemata in judgements under uncertainty. In: KAHNEMANN, D. (Hrsg.) ; SLOVIC, P. (Hrsg.) ; TVERSKY, A. (Hrsg.): *Judgement under uncertainty: Heuristics and Biases*. Cambridge, Großbritannien : Cambridge University Press, 1982
- VDI FAS 2004** VDI FAS (Hrsg.): *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme – 21. VDI/VW-Gemeinschaftstagung*. Wolfsburg : VDI Verlag, 2004
- VICS 1990** : *Vehicle Information and Communication System (VICS)*. 1990. – URL <http://www.vics.or.jp/english/>. – Zugriffsdatum: 21.10.2007
- von Reyher 2006** VON REYHER, Alexander: *Lidarbasierte Fahrstreifenzuordnung von Objekten für eine Abstandsregelung im Stop & Go-Verkehr*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2006
- Voy u. a. 1986** VOY, Christian ; HAMM, Ludwig ; PANIK, Ferdinand ; REISTER, Dietrich: PROMETHEUS, ein europäisches Forschungsprojekt zur Gestaltung des Straßenverkehrs der Zukunft. In: *Elektronik im Kraftfahrzeugbau*. Düsseldorf : VDI Verlag, 1986 (VDI-Berichte 612), S. 1–13
- Werther 2006** WERTHER, Bernd: *Kognitive Modellierung mit Farbigen Petrinetzen zur Analyse menschlichen Verhaltens*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2006
- Wiedemann 1974** WIEDEMANN, Rainer ; LEUTZBACH, Wilhelm (Hrsg.): *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Bd. 8. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, 1974
- Winner 2002** WINNER, Herman: *Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung ACC*. Robert Bosch Automotive Aftermarket Verlag, 2002
- Winner 2003** WINNER, Hermann: Die lange Entwicklung des ACC.

In: *Stiller, Christoph; Maurer, Markus: Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2003, Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V., Karlsruhe, 2003*

**Winner und Luh 2007** WINNER, Hermann ; LUH, Steffen: Fahrversuche zur Funktionsbewertung von ACC – Eine Zwischenbilanz. Darmstadt : ergonomia Verlag, 2007 (Darmstädter Kolloquium Mensch und Fahrzeug)

**Yi u. a. 2000** YI, Zou ; KHING, Ho Y. ; SENG, Chua C. ; WEI, Zhou X.: Multi-ultrasonic sensor fusion for mobile robots. In: *Proceedings of SPIE – Sensor Fusion: Architectures, Algorithms and Applications IV* Bd. 4051, 2000, S. 314–321

**Zadeh 1965** ZADEH, Lotfi A.: Fuzzy Sets. In: *Information and Control* 8 (1965), S. 338–353

**Zavrel u. a. 2004** ZAVREL, Martin ; SIEDERSBERGER, Karl-Heinz ; BREU, Alexander ; MAURER, Markus: Stauassistent – Teilautomatisierte Fahrzeugführung im Niedriggeschwindigkeitsbereich. In: *Autoreg*, 2004

**Zeller 1996** ZELLER, Martin: *Planerkennung im Straßenverkehr*. Düsseldorf : VDI Verlag, 1996 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Nr. 282)

**Zlocki 2007** ZLOCKI, Adrian: Situation classification for a traffic situation and infrastructure adaptive ACC-system. In: *4<sup>th</sup> International Workshop on Intelligent Transportation*. Hamburg, 2007

**Zlocki 2008** ZLOCKI, Adrian: Fahrsituationsabhängig geregeltes ACC-System für den Einsatz im urbanen Umfeld. In: ([Gesamtverband für Verkehr Braunschweig e.V. 2008](#))